



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO



**Dinâmica da água e qualidade de pastagens no efluxo de CO₂ em encostas de
Argissolo Vermelho Amarelo**

Tiago de Carvalho Pessoa

AREIA, PB
JUNHO DE 2019

TIAGO DE CARVALHO PESSOA

**DINÂMICA DA ÁGUA E QUALIDADE DE PASTAGENS NO EFLUXO DE CO₂
EM ENCOSTAS DE ARGISSOLO VERMELHO AMARELO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de “Doutor em Ciência do Solo”. Área de concentração: Solos em Agroecossistemas familiares. Linha de pesquisa: ciclos biogeoquímicos em agroecossistemas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Vânia da Silva Fraga

AREIA, PB
JUNHO DE 2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P475d Pessoa, Tiago de Carvalho.

Dinâmica da água e qualidade de pastagens no efluxo de CO₂ em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo / Tiago de Carvalho Pessoa. - Areia, 2019.
107 f.: il.

Orientação: Vânia da Silva Fraga.
Tese (Doutorado) - UFPB/PPGCS-CCA.

1. Topossequência. 2. Modelo BEST. 3. Umidade do solo.
4. Granulometria. I. Fraga, Vânia da Silva. II. Título.

UFPB/BC

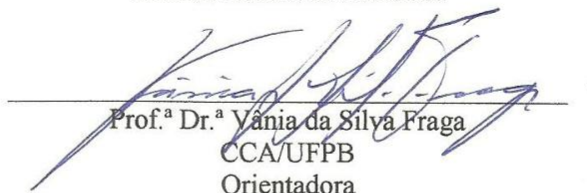
TIAGO DE CARVALHO PESSOA

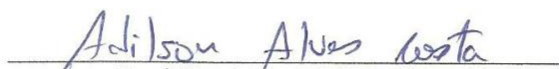
**DINÂMICA DA ÁGUA E QUALIDADE DE PASTAGENS NO EFLUXO DE CO₂
EM ENCOSTAS DE ARGISSOLO VERMELHO AMARELO**

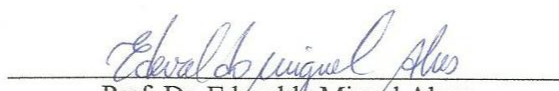
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de “Doutor em Ciência do Solo”. Área de concentração: Solos em Agroecossistemas familiares. Linha de pesquisa: ciclos biogeoquímicos em agroecossistemas.

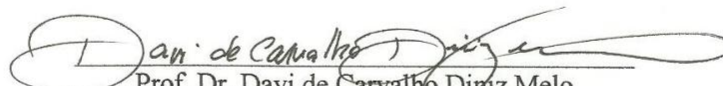
Aprovada em 19 de junho de 2019.

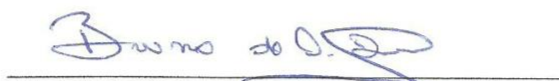
BANCA EXAMINADORA


Prof.ª Dr.ª Yânia da Silva Fraga
CCA/UFPB
Orientadora


Prof. Dr. Adilson Alves Costa
DCH/UNEB
Examinador externo


Prof. Dr. Edevaldo Miguel Alves
DEN/UFPE
Examinador externo


Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo
CCA/UFPB
Examinador interno


Prof. Dr. Bruno de Oliveira Dias
CCA/UFPB
Examinador interno

Ao queridíssimo PROFESSOR Ignacio Hernan Salcedo (*in memoriam*) pelos valorosos ensinamentos, pelas palavras, atos, exemplos e seus valiosíssimos conselhos.

À minha querida avó (Sr.^a Jacinta) pelos muitos conselhos e eterno carinho, tantas coisas aprendi com sua divina sabedoria e sua humildade incomparável.

À minha amada MÃE (Maria Rita) exemplo de tudo que há de bom nessa terra, minha maior riqueza, minha heroína, minha inspiração.

À minha queridíssima esposa (Tayse Vanessa M. C. Carvalho) não encontro palavras que descrevam minha gratidão a você, como não encontro palavras, restam-me os sentimentos sinceros. Obrigado por tudo, você é o meu anjo, minha amada.

DEDICO

Aos meus familiares (família Carvalho) nas pessoas de: Tio Miguel, Tia Lourdes e de minha irmã Maria Úrsula.

Aos Familiares de Minha esposa (família Matias da Costa) nas pessoas de minhas cunhadas (Ana, Alcinéia, Graça, Maria, Neidja), minha sogra (Eunice Maria) e meu sogro (Narciso Francisco).

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por colocar pessoas especiais em meu caminho e por, essas, sempre estarem ao meu lado em todos os momentos. A Nossa Senhora por sempre aplinar meus caminhos e me cobrir com sua bondade maternal, a São José, Santo Antônio, São Francisco e São Tiago; aos quais sempre dirijo preces e súplicas.

À minha esposa Tayse Vanessa Matias da Costa Carvalho pelo amor, apoio, dedicação, incentivo e compreensão; por dividir comigo as dificuldades e alegrias da vida. À minha mãe Maria Rita por todo incentivo, compreensão e paciência durante minha ausência. Foram mais de 12 anos, nos quais sempre encontrei nela abrigo, conselhos, esperança, confiança e exemplo concreto. Um verdadeiro exemplo, desde quando nos criou sozinha, com sua força, fé e dignidade, até os dias atuais.

A minha avó Jacinta, minha família, tios, tias, primos, primas, sobrinhas e sobrinhos e a minha irmã. À família de minha esposa, minhas muitas cunhadas, em especial Ana Matias, Alcinéia, Maria, Neidja e Graça..., meu cunhado Antônio, minha sogra e meu sogro. Ao Meu pai José pessoa, Irmã Ana, dona Antônia, Prof.^a Neide (ex-secretária da educação de Mataraca-PB), Prof.^a Elaine (minha professora do ensino fundamental).

A prof.^a Vânia Fraga por todo ensinamento, estímulo, paciência, confiança, preocupação, amizade e seriedade que dedicou para orientação deste trabalho. Ao prof.^o Bruno Dias, pelo apoio, incentivo, preocupação e paciência, sempre presente e disponível a ajudar. Ao Dr. Alex Matheus Rebequi, sua tese foi referência para a execução desse trabalho.

Ao prof.^o Antonino (coordenador do grupo de estudos do DEN-UFPE), que com muita hombridade cumpriu o que havia acordado com o prof.^o Ignacio Hernan Salcedo (*In memoriam*), que mesmo após seu descanso eterno, não deixou seus orientados sem quem os apoiassem em seus trabalhos. Ao grupo de estudos que auxiliou esse trabalho, em especial, ao prof.^o Edevaldo Alves, se não fosse vossa bondade, paciência, auxílio, prestatividade e ensinamentos, fatalmente esse trabalho não seria concluído.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos; e ao projeto: Observatório Nacional da Dinâmica da Água e de Carbono no Bioma Caatinga – ONDACBC, pelo apoio a esta pesquisa, bem como, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) e ao Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) pelo apoio intelectual e estrutural.

Ao Dr. Marivardo Toscano proprietário da fazenda Riachão, grande incentivador das pesquisas agropecuárias em sua propriedade, meus agradecimentos pela disponibilidade de suas áreas de pastagem para realização do presente estudo. E a todos os funcionários da Fazenda Riachão, em especial ao Sr. Peixoto (administrador), Nequinho e João.

Ao amigo Lindolfo Santana (pela amizade de longa data) e a toda família Santana. E aos amigos: Antônio Rosendo (Tota), Antônio João (Lorde Bala), Valério (Véi), Valter Silva (Valter Mataraca), Cristiano. Aos colegas que fiz na comunidade Mutirão (Sr. Cícero, Sr^a Irene, José Cláudio, José Júlio, Sr^a Maria dona do apto, Zezinho, Nevinha e esposo, Sr^a Dora e a todos os demais que não estão listados, mas sempre lembrados.

Ao mestre Fernando Julião e em especial, a Dr.^a Kalline Almeida e ao Dr. Ewerton Abrantes, pelo compartilhamento de seus conhecimentos para uso nesse trabalho. Aos ex-

bolsistas de iniciação científica, que tanto contribuíram para a tese, com sua dedicação e zelo, tanto em campo, quanto nas análises em laboratório, foram eles: o Eng.º agrônomo Galileu Medeiros e a Eng.ª agrônoma Júlia Eudócia. A Eng.ª agrônoma Geiziane da Silva, pelas inúmeras análises realizadas e por tanta dedicação e cuidado com tais dados; ao Eng.º agrônomo Rodolfo Félix (“O mito”) que dedicou muitos meses, muita paciência e muita energia em vários dos estágios desse trabalho. O Antônio que tanto nos ajudou.

Ao Msc. Renato Francisco, Dr. Tancredo Augusto, Dr. Rodolfo Nascimento, Msc. Renato Falconeres, Msc.ª Lúcia de Oliveira, Msc. João Belarmino, Msc. Gaudêncio, Msc.ª Edjane, Msc. Denisvaldo (Dênis), Msc. Cássio, Msc. Raimundo, Msc. Bruno Soares, Msc. Evaldo, Msc. Luan aos atuais e aos ex-colegas do LabMOS e do PPGCS, CCA/UFPB. Aos quais tenho muito apreço.

A todos os professores e funcionários do PPGCS/CCA/UFPB e do DSER da UFPB que colaboraram para a efetivação deste trabalho, Sr.ª Marielza, André, Vaval e ao Tana.

Aos membros da banca examinadora, professores: Dr. Bruno de Oliveira Dias, Dr.ª Vânia da Silva Fraga, Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo, Dr. Edevaldo Miguel Alves e o Dr. Adilson Alves Costa pela participação e sugestões para a melhoria deste trabalho.

Ao Professor Dr. Walter Esfrain Pereira, pelas contribuições e pela Santa paciência em fazer, tantas vezes, a estatística deste trabalho.

Enfim, a todos aqueles que não foram citados, mas, que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO GERAL.....	x
ABSTRACT GENERAL.....	xi
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.2. REFERÊNCIAS.....	4
1.3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
1.3.1. Caracterização hidrodinâmica do solo.....	5
1.3.2. Influência do relevo na umidade do solo.....	7
1.3.3. Pastagens de <i>Urochloa decumbens</i>	9
1.3.4. Serrapilheira da pastagem.....	10
1.3.5. Efluxo de CO ₂ do solo.....	12
1.3.6. Influência do relevo nas propriedades do solo e produção da pastagem.....	14
1.3.7. Nitrogênio, Fósforo e Potássio na Produção de Forragem.....	17
1.4. REFERÊNCIAS.....	19
2. CAPÍTULO I: Caracterização hidrodinâmica de um Argissolo em encostas sob pastagem, utilizando o método Beerkan	
2.1. RESUMO.....	31
2.2. ABSTRACT.....	32
2.3. INTRODUÇÃO	33
2.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
2.4.1. Área de estudo.....	34
2.4.3. Quantificação da pluviosidade e do armazenamento de água nas encostas.....	36
2.4.4. Modelo BEST- Algoritmo de análise de dados.....	37
2.4.4.1. Ensaio de infiltração e análise física do solo.....	38
2.4.4.2. Curva granulométrica.....	38
2.4.4.3. Metodologia Beerkan.....	38
2.4.4.4. Escalas características.....	39
2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
2.6. CONCLUSÕES.....	49
2.7. REFERÊNCIAS.....	50
3. CAPÍTULO II: Efluxo de CO₂ na produção de serrapilheira e pastagem de <i>Urochloa decumbens</i> em Argissolo	
3.1. RESUMO.....	53
3.2. ABSTRACT.....	54
3.3. INTRODUÇÃO.....	55
3.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	56
3.4.1. Área de estudo.....	56
3.4.2. Classificação da encosta.....	57
3.4.3. Precipitação pluvial e umidade do solo.....	58
3.4.4. Caracterização física e química do solo.....	59
3.4.5. Produção de forragem.....	59
3.4.6. Produção de Serrapilheira.....	60
3.4.7. Análises bromatológicas.....	61
3.4.8. Efluxo de C-CO ₂	61
3.4.9. Análise estatística.....	62
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
3.5.1. Análise química da fertilidade do solo.....	63
3.5.2. Análise física do solo.....	66

3.5.3. Serrapilheira e forragem de <i>Urochloa decumbens</i> , efluxo de CO ₂ e umidade do solo.....	68
3.5.4. Qualidade da serrapilheira e da forragem e decomposição da serrapilheira.....	71
3.6. CONCLUSÕES.....	74
3.7. REFERÊNCIAS.....	75

4. CAPÍTULO III: Produção e nutrição de pastagens com diferentes idades de estabelecimento em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo

4.1. RESUMO.....	79
4.2. ABSTRACT.....	80
4.3. INTRODUÇÃO.....	81
4.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	82
4.4.1. Área de estudo.....	82
4.4.2. Classificação e divisão das encostas.....	83
4.4.3. Quantificação da precipitação pluvial e umidade do solo.....	84
4.4.4. Caracterização física e química do solo.....	85
4.4.5. Produção de forragem.....	85
4.4.6. Análises bromatológicas.....	86
4.4.7. Efluxo de C-CO ₂	86
4.4.8. Análise estatística.....	87
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	88
4.5.1. Análise física do solo.....	88
4.5.2. Análise química da fertilidade do solo.....	90
4.5.3. Qualidade da pastagem em função das estações do ano.....	93
4.5.4. Matéria seca de <i>Urochloa decumbens</i> , efluxo de CO ₂ e umidade do solo.....	96
4.5.5. Produção de matéria seca (MS) de <i>Urochloa decumbens</i> e umidade do solo (θ).....	100
4.6. CONCLUSÕES.....	103
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
4.8. REFERÊNCIAS.....	105

LISTA DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO I: Caracterização hidrodinâmica de um Argissolo em encostas sob pastagem, utilizando o método Beerkan	
Tabela 1. Características da pastagem e do relevo na encosta 22 (E22) e na encosta E2 (E2).....	36
Tabela 2. Curvas de calibração da umidade volumétrica de um Argissolo Vermelho Amarelo em duas profundidades na encosta 22 (E22) e na encosta 2 (E2) nas posições do ombro, meia encosta e pedimento	37
Tabela 3. Caracterização física do Argissolo Vermelho Amarelo em duas profundidades nas posições do ombro, meia encosta e pedimento na encosta 22 (E22) e encosta 2 (E2) sob pastagens.....	40
Tabela 4. Parâmetros da caracterização hidrodinâmica de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 22 (E22) e encosta 2 (E2) sob pastagens.....	44
 CAPÍTULO II: Efluxo de CO ₂ na produção de serrapilheira e pastagem de <i>Urochloa decumbens</i> em Argissolo	
Tabela 1. Características da pastagem e do relevo na encosta.....	58
Tabela 2. Matriz de correlação da caracterização química de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem.....	63
Tabela 3. Caracterização química da fertilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem.....	65
Tabela 4. Matriz de correlação da caracterização física de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem	66
Tabela 5. Matriz de correlação das variáveis analisadas na serrapilheira e na forragem de <i>Urochloa decumbens</i> , efluxo de CO ₂ e umidade do solo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem.....	68
Tabela 6. Caracterização bromatológica da forragem de <i>Urochloa decumbens</i>	72
Tabela 7. Caracterização bromatológica da serrapilheira de <i>Urochloa decumbens</i>	72
 CAPÍTULO III: Produção e nutrição de pastagens com diferentes idades de estabelecimento em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo	
Tabela 1. Características da pastagem e do relevo na encosta 22 (E22) e na encosta 2 (E2).....	84
Tabela 2. Matriz de correlação da caracterização física de um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-20 cm, de duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades.....	88
Tabela 3. Matriz de correlação da caracterização química de um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-20 cm, de duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades.....	90
Tabela 4. Caracterização química da fertilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade, em duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades.....	91
Tabela 5. Matriz de correlação da qualidade de <i>Urochloa decumbens</i> em pastagens com diferentes idades num Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento.....	93
Tabela 6. Matriz de correlação do efluxo de CO ₂ , umidade do solo e das variáveis analisadas na <i>Urochloa decumbens</i> em pastagens com diferentes idades num Argissolo Vermelho Amarelo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento de duas encostas...	96

LISTA DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO I: Caracterização hidrodinâmica de um Argissolo em encostas sob pastagem, utilizando o método Beerkan	
Figura 1. Posições do relevo na topossequência por Santos, Salcedo e Candeias (2002)....	35
Figura 2. Armazenamento médio mensal de água pluvial aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade em um Argissolo vermelho Amarelo nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 22 (E22) e encosta 2 (E2) sob pastagens.....	41
Figura 3. Curvas granulométricas aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade em um Argissolo Vermelho Amarelo nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 22 (E22) e encosta 2 (E2) sob pastagens.....	42
Figura 4. Curvas de infiltração acumulada [I(mm)] em função do tempo para os 0-10 e 10-20 cm de profundidade, no Argissolo Vermelho Amarelo nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 22 (E22) e encosta 2 (E2) sob pastagens.....	43
Figura 5. Curvas de retenção de água em um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento na encosta 22 (E22) e encosta 2 (E2) sob pastagens.....	46
Figura 6. Curvas de condutividade hidráulica de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 22 (E22) e encosta 2 (E2) sob pastagens.....	48
 CAPÍTULO II: Efluxo de CO ₂ na produção de serrapilheira e pastagem de <i>Urochloa decumbens</i> em Argissolo	
Figura 1. Posições do relevo na encosta (Santos; Salcedo; Candeias, 2002).....	57
Figura 2. Pluviosidade mensal nos anos de 2016 e 2017.....	58
Figura 3. Análise de componentes principais da caracterização química de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem.....	64
Figura 4. Análise de componentes principais da caracterização física de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem.....	67
Figura 5. Análise de componentes principais da serrapilheira e da forragem de <i>Urochloa decumbens</i> , efluxo de CO ₂ e umidade do solo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem.....	69
Figura 6. Taxa de decomposição da serrapilheira de <i>Urochloa decumbens</i> durante 150 dias de avaliação, nas posições do ombro (Om), meia encosta (ME) e pedimento (Ped).....	73
 CAPÍTULO III: Produção e nutrição de pastagens com diferentes idades de estabelecimento em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo	
Figura 1. Posições do relevo na topossequência por Santos, Salcedo e Candeias (2002)....	84
Figura 2. Pluviosidade média mensal no ano de 2017, na área experimental da microbacia hidrográfica de Vaca Brava-PB.....	85
Figura 3. Análise de componentes principais da caracterização física de um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-20 cm, de duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades.....	99
Figura 4. Análise de componentes principais da caracterização química de um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-20 cm, de duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades.....	92
Figura 5. Análise de componentes principais da qualidade de <i>Urochloa decumbens</i> de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade em duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades.....	94
Figura 6. Análise de componentes principais do efluxo de CO ₂ , umidade do solo e das variáveis analisadas na <i>Urochloa decumbens</i> em pastagens com diferentes idades num Argissolo Vermelho Amarelo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento de duas encostas.....	97

Figura 7. Produção de matéria seca (MS) de *Urochloa decumbens* e relação com a umidade do solo (θ) em duas pastagens com diferentes idades num Argissolo Vermelho Amarelo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento de duas encostas..... 101

PESSOA, Tiago de Carvalho. **Dinâmica da água e qualidade de pastagens no efluxo de CO₂ em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2019.

RESUMO GERAL

A capacidade produtiva das pastagens está relacionada à idade de estabelecimento dessas e as características do solo. No Nordeste brasileiro os solos destinados às pastagens são geralmente em áreas de encostas, a inclinação das encostas favorece a variabilidade nas propriedades hidrodinâmicas do solo e resultam em modificação nas características físicas e químicas. Além disso, pastagens cultivadas em solo sem adubação dependem da ciclagem dos nutrientes provenientes da serrapilheira da pastagem, processo que resulta em emissão de CO₂ para a atmosfera. Diante do exposto, executou-se esse trabalho, dividido em três capítulos independentes, mas complementares. Com o objetivo de utilizar o método Beerkan na obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos do solo para determinação das curvas de retenção- $\theta(h)$ e condutividade hidráulica- $K(\theta)$ e da força de retenção predominante (Capítulo I); avaliar o efluxo de CO₂ do solo, a produção e qualidade da forragem e da serrapilheira de *Urochloa decumbens* (Capítulo II) e determinar as diferenças no efluxo de CO₂ do solo, na produção de forragem e na qualidade das pastagens com distintas idades (Capítulo III). Os capítulos I e III foram desenvolvidos em três posições do relevo: ombro, meia encosta e pedimento de duas encostas sob pastagens com diferentes idades de estabelecimento (uma com 2 anos de uso-E2 e uma com 22 anos de uso-E22). Já o capítulo II foi desenvolvido nas três posições do relevo, mas apenas em uma encosta (E22). O armazenamento de água no solo foi avaliado utilizando a sonda de capacitância modelo *Diviner* 2000. A determinação dos parâmetros hidrodinâmicos foi através do modelo BEST no programa *Scilab* 5.3.3. A produção de matéria seca de serrapilheira foi avaliada com anel de infiltração, já a produção e o conteúdo de nutrientes no pasto foram obtidos com gaiolas de exclusão, enquanto o efluxo de CO₂ foi quantificado em câmaras estáticas. Os resultados indicaram variabilidade granulométrica entre as posições topográficas, sendo que na E22 existe mais argila que na E2. O armazenamento de água e as curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ variaram em função das características granulométricas e hidrodinâmicas, que diferiram em profundidade, e em relação à posição na encosta e ao tempo de pastejo sobre a mesma. Os íons Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, a acidez potencial e a umidade do solo são maiores no ombro e meia encosta, onde há maior concentração de matéria orgânica e argila. K⁺, Na⁺, efluxo de CO₂, areia e porosidade total são maiores no pedimento, posição que armazena menos água. Houve correlação positiva entre efluxo de CO₂ do solo e matéria seca de serrapilheira + forragem. Independentemente da idade de uso da pastagem sobre a encosta, a maior produção foi no pedimento e a menor na meia encosta. A renovação da pastagem reduziu a emissão de CO₂, melhorou a qualidade do pasto, e aumentou a produção.

Palavras-chave: Toposequência; Modelo BEST; Umidade do solo; Granulometria;

PESSOA, Tiago de Carvalho. **Water dynamics and grassland quality in the efflux of CO₂ on hillslopes of Yellow Red Ultisol**. 2019. Thesis (Doctorate in Soil Science) - Post Graduate Program in Soil Science, Federal University of Paraiba, Areia, 2019.

ABSTRACT GENERAL

The productive capacity of the grassland is related to the age of establishment of these and the characteristics of the soil. In the Brazilian Northeast, grassland soils are generally in hillslope areas, slope hillslope favor variability in soil hydrodynamic properties and result in changes in physical and chemical characteristics. In addition, grassland cultivated on soil without fertilization depend on the cycling of nutrients from the grassland litter, process that results in efflux of CO₂ into the atmosphere. Against the foregoing, this work was carried out, divided into three independent but complementary chapters. With the aim of determine the curves retention- $\theta(h)$ and hydraulic conductivity- $K(\theta)$ and the predominant retention force, use of the Beerkan method to obtain hydrodynamic soil parameters (Chapter I); to evaluate the efflux of CO₂ from the soil, the production and quality of the forage and the litter of *Urochloa decumbens* (Chapter II); and determine the differences in soil CO₂ efflux, forage production and quality of grassland of different ages (Chapter III). Chapters I and III were developed in three relief positions: shoulder, backslopes and footslope of two hillslopes under grasslands with different ages of establishment (one with 2 years of use-E2 and one with 22 years of use-E22). Chapter II was developed in the three relief positions, but only on a hillslope (E22). Soil water storage was evaluated using the *Diviner* 2000 capacitance probe. The hydrodynamic parameters were determined using the BEST model in the *Scilab* program 5.3.3. The production of litter dry matter was evaluated with infiltration ring, already the production and the nutrient content in the grassland were obtained with exclusion cages, while the efflux of CO₂ was quantified in static chambers. The results indicated granulometric variability among the topographic positions, and in E22 there is more clay than in E2. The water storage and the curves $\theta(h)$ and $K(\theta)$ varied according to the granulometric and hydrodynamic characteristics, which differed in depth, and in relation to the position on the hillslope and the time of grazing on the same. The ions Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, the potential acidity and soil moisture are higher in the shoulder and backslopes, where there is higher concentration of organic matter and clay. K⁺, Na⁺, CO₂ efflux, sand and total porosity are larger in the footslope, position that stores less water. There was a positive correlation between CO₂ efflux of soil and dry matter of litter + forage. Regardless of the age of grassland use on the hillslope, the highest yield was in the footslope and the lowest in the backslopes. The recovery of grassland reduced CO₂ emissions, improvement pasture quality, and increased production.

Keywords: Toposequence; Model BEST; Soil moisture; Granulometry;

1. INTRODUÇÃO GERAL

As pastagens são a principal fonte de alimentos, e a mais barata, para a produção pecuária no Brasil; que possui o maior rebanho comercial de bovinos do mundo, 85% dessas pastagens são compostas por gramíneas do gênero *Urochloa* (SOUZA et al., 2016). Com metade desses percentuais constituídos pela espécie *Urochloa decumbens*; em virtude de sua aptidão produtiva em clima tropical, mesmo em condições desfavoráveis de fertilidade do solo.

No Brejo paraibano, as pastagens foram implantadas em áreas consideradas impróprias para agricultura devido à baixa fertilidade do solo, e/ou o relevo declivoso (LIMA, SALCEDO e FRAGA, 2008). Soma-se a isto o fato de nessa atividade, na região, não haver a reposição dos nutrientes exportados pela cultura, da cultura ser perene, geralmente cultivada por décadas e de não haver uma preocupação com o sobrepastoreio das áreas sob pastagem.

Em tais condições, a sustentabilidade do ecossistema advém da capacidade adaptativa da gramínea às condições edafoclimáticas vigentes, e da reciclagem dos nutrientes oriundos das excretas bovinas e da serrapilheira da pastagem (VENDRAMINI; DUBEUX Jr e SILVEIRA, 2014). Essa última é distribuída de forma uniforme em toda a área, e ocorre com ou sem a presença de animais. A serrapilheira da pastagem além de ser muito importante na reposição de nutrientes ao solo, também contribui com o aumento da matéria orgânica e melhora as características físicas do mesmo.

Entretanto, a decomposição dessa serrapilheira para liberação de nutrientes, entre eles Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) que garantem a sustentabilidade desse ecossistema por longos anos, resultam na oxidação de Carbono a dióxido de Carbono (CO₂) contribuindo com a emissão desse gás para a atmosfera (KIZEKOVÁ et al., 2018; ZAGATO et al., 2018). A dinâmica de decomposição da serrapilheira da pastagem em áreas de encostas é controlada pela posição no relevo, granulometria e umidade do solo. Com a decomposição e a maior emissão de CO₂, em regiões semiáridas, ocorrendo na estação chuvosa.

A produção de forragem e de serrapilheira da pastagem em áreas de encostas, depende das diferentes posições do relevo. Com a maior produção observada na posição do pedimento, tais observações são consequências das propriedades granulométricas do solo, que influem na umidade, na fertilidade e no efluxo de CO₂ para a atmosfera (REBEQUI, 2015).

Nesse caso, a declividade não é um fator limitante em se tratando de posição, como uma paisagem individual, pois distintas posições podem apresentar a mesma declividade, mas a localização da posição é um fator limitante, pois representa maior ou menor sujeição aos efeitos da erosão hídrica. Essa erosão atua na modificação da granulometria e da fertilidade do solo ao longo do relevo (SANTOS e SALCEDO, 2010), e tem relação direta com a heterogeneidade das propriedades hidrodinâmicas ao longo da encosta.

A variabilidade espacial das propriedades físicas do solo ao longo da encosta incide em efeito variável da erosão hídrica. Esse efeito implica em acentuação das diferenças granulométricas do solo na paisagem da encosta, que influi diretamente na fertilidade do solo, essas diferenças granulométricas também influem e são influenciadas pelas características hidrodinâmicas, que atuam no escoamento, na retenção e na infiltração de água.

Os parâmetros hidrodinâmicas do solo, para determinação da retenção de água e da condutividade hidráulica, podem ser determinados por métodos de simulação, que trazem de forma simples, rápida e bastante econômica, meios para a estimativa dos parâmetros necessários à determinação das curvas de retenção e de condutividade hidráulica do solo, entretanto, é necessário atentar que são determinações indiretas e que tem erro associado à determinação, mas que não inviabiliza o método.

Um método de simulação, de uso acessível e de baixo custo, que tem se adequado bem aos estudos hidrodinâmicos em áreas de pastagens e também em áreas de encostas é o método Beerkan, e para sua execução é utilizado o modelo BEST (SOUZA et al., 2008).

Essas informações hidrodinâmicas servem para entendermos as heterogeneidades em áreas de encostas, que influem diretamente no armazenamento de água, na produção de forragem, na decomposição da serrapilheira e na emissão de CO₂.

Em pastagens sobre ambiente de encosta, há grande influência do relevo, mas também do pisoteio animal, na alteração das características físicas do solo, em especial na compactação (OLIVEIRA Jr et al., 2014). No entanto, o sistema radicular da pastagem que é fisiologicamente adaptada para as sucessivas desfolhas, e a serrapilheira, atenua esses efeitos deletérios nesse ecossistema, sobretudo na camada superficial do solo (0-20 cm). Além disso, pela decomposição da serrapilheira há a disponibilidade de N, P e K no solo, para ser absorvido pela cultura, entretanto, com emissão de CO₂ pelos organismos heterotróficos durante o processo de decomposição.

A produção de pasto para pecuária bovina, na região agreste da Paraíba, ocorre por longos períodos de tempo em áreas de encostas, sem a reposição dos nutrientes

exportados pela cultura e sem a renovação da pastagem. E pode levar à degradação do solo, pois é uma condição de extrativismo, porque as entradas de nutrientes, excluindo-se as deposições atmosféricas, advém principalmente da decomposição da serrapilheira.

Além disso, a produção varia ao longo do relevo, e pode está associada com a variação na fertilidade do solo, a absorção de nutrientes pela planta e a umidade do solo e tudo isso impacta na emissão de CO₂ para a atmosfera. Tanto a fertilidade, quanto o efluxo de CO₂ são influenciados pelas variações na umidade do solo, que é controlada pelas características hidrodinâmicas, dependentes da estrutura e da textura do solo.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efluxo de CO₂ na produção e qualidade de pastagem de *Urochloa decumbens* em um Argissolo Vermelho Amarelo em função do relevo, da umidade do solo e do tempo de pastejo, após implantação do pasto. Para isso, dividiram-se as informações produzidas, em três capítulos na forma de artigos independentes, mas, complementares.

O capítulo I: “Caracterização hidrodinâmica de um Argissolo em encostas sob pastagem, utilizando o método Beerkan” surgiu da hipótese que a granulometria do solo tem mais influência nas características hidrodinâmicas e no armazenamento de água, que a localização da posição topográfica no relevo. Neste contexto, usou-se o método Beerkan na obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos para determinação das curvas de retenção- $\theta(h)$ e condutividade hidráulica- $K(\theta)$ e da força de retenção predominante, em três posições de duas encostas em um Argissolo Vermelho Amarelo sob pastagem.

No “**capítulo II: Efluxo de CO₂ na produção de serrapilheira e pastagem de *Urochloa decumbens* em Argissolo**” surgiu da hipótese que em área de encosta sob pastagem, o efluxo de CO₂ está relacionado à posição no relevo, a produção de pasto e a decomposição da serrapilheira. Dessa maneira, o objetivo desse capítulo foi avaliar o efluxo de CO₂ na produção e qualidade da forragem e da serrapilheira de *Urochloa decumbens*, em três posições do relevo em uma encosta de Argissolo Vermelho Amarelo.

Já o “**capítulo III: Produção e qualidade de pastagens com diferentes idades de estabelecimento em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo**” é oriundo da hipótese que em solos sem reposição dos nutrientes extraídos e exportados pelas pastagens, a recuperação da pastagem tem maior influência na redução do efluxo de CO₂ do solo, no aumento da produção e melhora da qualidade da forragem, do que o conteúdo de água do solo e a posição na encosta, quando a fertilidade for igualmente limitante nas distintas idades de recuperação. Assim, objetivamos identificar as diferenças na produção de forragem e na absorção de nutrientes em pastagens com idades distintas de implantação do pasto, em duas encostas de Argissolo Vermelho Amarelo.

1.2. REFERÊNCIAS

- KIZEKOVÁ, M.; HOPKINS, A.; KANIANSKA, R.; MAKOVNÍKOVÁ, J.; POLLÁK; PÁLKA, B. Changes in the area of permanent grassland and its implications for the provision of bioenergy: Slovakia as a case study. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 1, p. 218–232, 2018.
- LIMA, A.G.; SALCEDO, I.H. & FRAGA, V.S. Composição botânica e cobertura do solo de pastagens de *Brachiaria*, em função da forma e posição no relevo. **In: Fertilidade do solo e produção de biomassa no Semi-árido**. Ed. universitária da UFPE, Recife, 2008. p.89-104.
- OLIVEIRA JÚNIOR, J. A. S.; SOUZA, E. S.; CORREA, M. M.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, R. M. S.; SILVA FILHO, L. A. Variabilidade espacial de propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico sob pastagem e caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 631–639, 2014.
- REBEQUI, A.M. **Dinâmica da água, do carbono e da produtividade em encosta sob pastagem**. 2015, 54 p. Il. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2015.
- SANTOS, A.C.; SALCEDO, I.H.; GALVÃO, S.R.S. Relações entre uso do solo, relevo e fertilidade do solo em escala de microbacia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.5, p.498-504, 2008.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.128-135, 2008.
- SOUZA, F. M.; LEMOS, B. J. M.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; MAGNABOSCO, C. U.; CASTRO, L. M.; LOPES, F. B.; BRUNES, L. C. Introdução de leguminosas forrageiras, calagem e fosfatagem em pastagem degradada de *Brachiaria brizantha*. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.17, n.3, p.355-364, 2016.
- VENDRAMINI, J.; DUBEUX Jr, J.C.; SILVEIRA, M.L. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.9, n.2, p.308-315, 2014.
- ZAGATO, L. Q. S. D.; ARAUJO, L. C.; SANTOS-ARAÚJO, S. N.; LUDKIEWICZ, M. G. Z.; JÚNIOR, O. S.; SANTOS, A. C. Decomposition of straw resulting from different strategies of recovery of degraded pastures using an integrated crop-livestock system. **Semina: Ciências Agrárias**, v.39, n.4, p.1397-1406, 2018.

1.3. REVISÃO DE LITERATURA

1.3.1. Caracterização hidrodinâmica do solo

A descrição ou predição da dinâmica da água no solo no campo (em processos de irrigação, drenagem, conservação de água, recarga subterrânea, infiltração e escoamento superficial) necessita do conhecimento das características hidrodinâmicas do solo, ou seja: i) da relação entre o potencial matricial (h) e a umidade volumétrica do solo $\theta(h)$, conhecida como curva característica da umidade do solo ou curva de retenção da água no solo, e ii) da relação entre a condutividade hidráulica e a umidade volumétrica $K(\theta)$, conhecida como curva de condutividade hidráulica (HILLEL, 2004; SOUZA et al., 2008; MA et al., 2017).

A distribuição e o armazenamento de água no solo são influenciados pelas variações topográficas, o que reflete na redistribuição da água para a bacia hidrográfica. A determinação das propriedades hidráulicas do solo é necessária para interpretar e simular muitos processos hidrológicos com importância ambiental, como a infiltração e o escoamento da água pluvial (IOVINO et al., 2016).

A intensidade das chuvas exerce forte influência na partição dessa água nos fluxos vertical e lateral em função da condutividade hidráulica do solo, que é mais intensa quando o solo está saturado (K_s), portanto, estimativas de K_s são essenciais para descrever e modelar processos hidrológicos (ZIMMERMANN et al., 2013). A água que infiltra no perfil do solo é filtrada, armazenada, utilizada pelas plantas e redistribuída subsuperficialmente. Por isso, o solo é um importante prestador de serviços ecossistêmicos relacionados ao ciclo hidrológico (O'GEEN et al., 2010).

A variabilidade no conteúdo de água armazenada no solo está associada tanto com a quantidade, como com a intensidade das chuvas. As mudanças no conteúdo armazenado dependem da quantidade de água que entra e do estado prévio do teor de água (RIVERA, LILLO e GRANDA, 2014). O movimento da água também varia em função da quantidade de chuva precipitada, sendo o fluxo de água, dentro do solo, na época mais seca, no sentido ascendente (perdas por evaporação); e no sentido descendente (infiltração da água) na estação chuvosa (SOUZA et al., 2015).

Quando o solo é utilizado com pastagem, o pisoteio intenso dos animais ocasiona a compactação o que, por sua vez, contribui para uma redução severa na macroporosidade, aumento da densidade do solo e redução da infiltração de água nas camadas mais superficiais alterando a condutividade hidráulica e outras características hidrodinâmicas. Essas alterações dependem sobremaneira do tipo de solo, da textura e do teor de matéria

orgânica, além da declividade, sendo mais acentuadas em solos argilosos do que em solos arenosos (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2014).

A obtenção de dados hidrodinâmicos podem ocorrer através da utilização de métodos semifísicos como o “Beerkan” (HAVERKAMP et al., 1998; LASSABATÈRE et al., 2006; BAGARELLO, DI PRIMA, IOVINO, 2017). O método Beerkan propõe a estimativa dos parâmetros das curvas de retenção- $\theta(h)$ e da condutividade hidráulica- $K(\theta)$ de forma rápida e de baixo custo, considerando a textura e a estrutura do solo.

Neste método, $\theta(h)$ e $K(\theta)$ podem ser descritos, analiticamente, por cinco parâmetros: dois de forma, m ou n e η , relacionados principalmente com a textura, e três de normalização θ_s , K_s e h_g , dependentes da estrutura do solo. Os parâmetros de forma são obtidos a partir da curva de distribuição dos tamanhos das partículas $F(D)$ e da porosidade, enquanto os parâmetros de normalização são determinados a partir de experimentos de infiltração (SOUZA et al., 2008; CASTELLINI, DI PRIMA, IOVINO, 2018).

Os modelos matemáticos de simulação, como o do método Beerkan de estimativa dos parâmetros de transferência do solo (BEST), são importantes ferramentas nos estudos relacionados ao transporte de água e nutrientes no sistema solo-planta-atmosfera, e podem ser aplicados para otimizar o uso da água, a fim de aumentar a produtividade das culturas. O modelo BEST permite a formulação e solução de problemas de fluxos de água pelo uso de métodos indiretos de análises, com base em aproximações de técnicas numéricas (AIELLO et al., 2014; ALAGNA et al., 2016; DI PRIMA et al., 2017).

Experimentos de infiltração com doze solos agrícolas foram realizados por Ma et al. (2017) para testar o método Beerkan. Os resultados indicaram que a estimativa da condutividade hidráulica saturada e das curvas de retenção foi consistente com os resultados medidos através de um método de pressão constante.

Padrões de distribuição espacial da K_s (condutividade hidráulica saturada) em solos da China refletiram amplamente as propriedades hidráulicas do solo e os efeitos combinados da textura, vegetação, topografia e a ação antrópica (WANG et al., 2013). Bevington et al. (2016) avaliando o efeito da interação entre textura e densidade do solo sobre n (parâmetro de forma) e K_s (condutividade hidráulica saturada), obtiveram maior influência da densidade do solo do que da textura do solo sobre K_s .

Em pastagens as propriedades hidrodinâmicas dos solos são afetadas por diversos fatores, sobretudo associados a aspectos espaciais e temporais relacionados às características dos sistemas radiculares e das taxas de pisoteio do gado (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2014). Soma-se a isto o fato de as pastagens, na Paraíba, serem cultivadas em paisagens de relevo ondulado, com variação de declividade e de textura do solo como

nas áreas de encosta da microbacia hidrográfica de Vaca Brava (SANTOS et al., 2009; SANTOS e SALCEDO, 2010).

Além disso, os elevados índices anuais de precipitação pluvial no brejo paraibano fazem da água o insumo mais importante para se obter elevada produtividade agrícolas nessa Região. Por isso conhecer o comportamento e o destino da água é de fundamental importância, principalmente nas questões relacionadas com o impacto ambiental e os serviços ecossistêmicos do solo (MACIEL-NETTO et al., 2013).

1.3.2. Influência do relevo na umidade do solo

O armazenamento de água no solo é um parâmetro crítico em processos hidrológicos que está ligado à precipitação, ao escoamento e a água subsuperficial (GAO e SHAO, 2012; PENNA et al., 2013; LI et al., 2016). A água do solo é muito influenciada pela quantidade e intensidade da chuva (LIU et al., 2015), tipo de vegetação (FANG et al., 2016), topografia (gradiente de inclinação, declive e elevação relativa) (YANG et al., 2015), propriedades do solo (densidade, matéria orgânica, argila, Silte e areia) (FANG et al., 2016) entre outros fatores. A combinação desses fatores de controle faz com que o armazenamento de água no solo varie espacial e temporalmente (LI et al., 2015a, 2015b).

Existe uma forte interação entre a dinâmica da água ao longo das encostas e a transferência de sedimentos, modificando continuamente a camada superficial do solo pelo efeito da erosão. Em um Argissolo sob relevo ondulado os processos erosivos arrastam a camada superficial do solo (parte do horizonte A) deixando a parte superior e média da encosta com cores avermelhadas, típicas do horizonte B, mais argiloso [afirmação de Salcedo (comunicação pessoal)]. A variabilidade diferenciada da erosão hídrica ao longo da encosta, implica em variações na taxa de infiltração de água, e no carreamento e deposição de sedimentos ao longo das posições da encosta (SANCHEZ et al., 2009; SANTOS, J., et al., 2010).

Encostas com o mesmo tipo de solo apresentam significativa heterogeneidade nas propriedades do solo dentro de cada posição topográfica. Tais diferenças são importantes para se inferir sobre os padrões de dinâmica da umidade do solo. Por exemplo, uma posição com a presença de horizonte B textural (Bt), poderia limitar (na profundidade desse horizonte) a área onde o fluxo lateral de água poderia ocorrer até a posição mais baixa da encosta (MARTINI et al., 2015). Além disso, as variações das características do solo em profundidade incidem em variações no armazenamento de água.

A topografia pode diminuir ou intensificar os efeitos do déficit hídrico sobre a vegetação (HAWTHORNE e MINIAT, 2018). A variação espacial da umidade do solo

aumenta ao longo da extensão da encosta durante os períodos de seca, principalmente nas camadas superficiais do solo (MITCHELL, BENYON e LANE, 2012). Essa variação também depende do tempo de duração da precipitação pluvial (IVANOV et al., 2010).

Entretanto, Dymond et al. (2017) e Silva et al. (2018) avaliaram que a topografia não alterou o armazenamento de água no solo. Tais resultados são marcantes, afinal comprova que em ambiente declivoso outros fatores, tais como teor de argila, compactação e uso do solo; além da inclinação incidem no armazenamento de água.

Uma grande variedade de processos ecossistêmicos nas posições mais baixas do relevo podem ser afetadas ou depender da variação espacial na umidade do solo, incluindo transpiração (EBERBACH e BURROWS, 2006; MACKAY et al., 2002), produção vegetal (ADAMS et al., 2014; BERDANIER e CLARK, 2016; ELLIOTT et al., 2015) e respiração do solo (RIVEROS-IREGUI e MCGLYNN, 2009; PACIFIC et al., 2011).

A umidade do solo avaliada por Hawthorne e Miniati (2017), em duas seções da paisagem do relevo, indicou que o efeito gravitacional influenciou os teores de umidade, pois a umidade na parcela mais baixa do relevo, no período seco, foi mais elevada que a da parcela superior, embora estivessem sob a mesma condição ambiental e mesma taxa de transpiração da vegetação. Porém, com distinta declividade média do relevo, na parcela superior (31°) e na inferior (26°); Wang et al. (2008) relataram que quando o gradiente de inclinação foi maior que 25°, o conteúdo de água no solo diminuiu acentuadamente apresentando diferença significativa ($p < 0,05$) em comparação com 9°, 15° e 20°.

Por isso, a maior umidade do solo (MARTINI et al., 2015) foi observada no fundo do vale, como consequência tanto da posição topográfica, quanto das propriedades locais do solo. O armazenamento de água no solo é influenciado pelo padrão espacial do relevo, pela profundidade do solo ao longo do transecto, e pelas mudanças nas estações secas e chuvosas que influenciam os processos hidrológicos na encosta (MEI et al., 2018). Esses mesmos autores relatam que o armazenamento de água na camada superficial do solo foi afetado principalmente pela topografia, enquanto na camada mais profunda foi controlado principalmente pelo tipo de vegetação.

Existem resultados que indicam que nem sempre o relevo determina heterogeneidade hídrica, como os de Silva et al. (2018) onde as características físico-hídricas estiveram mais associadas à granulometria do solo que à posição na paisagem. Dymond et al. (2017) observaram que o tipo de cobertura, a textura do solo e o tempo estavam relacionados com a água disponível para as plantas, e que a topografia não estava, significativamente, relacionada com a água disponível para as plantas em uma paisagem de baixo relevo.

1.3.3. Pastagens de *Urochloa decumbens*

As pastagens consistem na opção alimentar mais abundantes e de menor custo para produção de proteína animal (SOUZA et al., 2016). Dados preliminares do último censo agropecuário (IBGE, 2017) descrevem que no Brasil há aproximadamente 47 milhões de hectares de pastagens naturais, e 112 milhões de hectares de pastagens cultivadas, sendo que dessas cerca de 100 milhões de hectares estão em boas condições e 12 milhões de hectares em más condições; e quase 172 milhões de bovinos (IBGE, 2017), por isso a pecuária é uma das principais atividades econômica do país. Cerca de 50% dessas áreas de pastagens no Brasil são constituídas pela espécie *Urochloa* (antiga *Brachiaria*) *decumbens* (SOUZA et al., 2016).

Na Paraíba, as áreas de pastagens naturais correspondem a aproximadamente 712 mil hectares, e as de pastagens plantadas correspondem a cerca de 183 mil hectares em boas condições de uso e 146 mil hectares em más condições de uso. Com mais de 1 milhão de bovinos em todas essas áreas (IBGE, 2017). Na microrregião do Brejo Paraibano, após o desmatamento da vegetação nativa foi implantado o cultivo agrícola, principalmente de cana-de-açúcar, depois do declínio do cultivo, iniciou-se o predomínio da utilização dessas terras com pastagens naturalizadas, principalmente, de gramíneas do gênero *Urochloa* (LIMA, 2007).

Entre as diversas espécies de pastagens, destacam-se a *Urochloa decumbens* cv Basilisk. Os capins do gênero *Urochloa*, apresentam algumas vantagens em relação a outros gêneros, devido a sua boa adaptação em condições desfavoráveis de solos e climas, tolerância à baixa fertilidade e elevado rendimento de matéria seca (MARANHÃO et al., 2010). A produção de matéria seca é o foco principal das pastagens extensivas, não só em quantidade (SILVA et al., 2018), mas também em qualidade.

O consumo diário de matéria seca é a medida mais importante para que se determine a resposta animal, possibilitando o conhecimento do manejo adequado do solo e planta, para o fornecimento de alimento com teores adequados de nutrientes (SANTOS et al., 2007). Por outro lado, as baixas produções são caracterizadas por limitações na disponibilidade de água e nutrientes do solo (PORQUEDDU et al., 2016; TIAN et al., 2018) e à falta de adubação (DIJKSTRA et al., 2016; SOUZA et al., 2016; XU et al., 2018).

A nutrição deficiente se constitui, provavelmente, no principal fator limitante da produção dos animais em pastejo, principalmente em regiões tropicais, onde estes estão sujeitos a mudanças contínuas no padrão de suprimento do alimento (EUCLIDES et al., 2000). Esses autores observaram que, em condições distintas de umidade, o tempo de

pastejo foi maior para os animais que pastejavam em *Urochloa Decumbens*, no período seco, que para aqueles que pastejaram em *Urochloa brizantha* durante o período chuvoso. Indicando que de fato, a *Urochloa decumbens*, apresenta melhores resultados no suprimento de forragem aos animais, criados em condição de sequeiro.

As pastagens de *Urochloa decumbens* também fornecem uma gama de serviços ecossistêmicos, tais como a cobertura do solo, a diversidade faunística dos ecossistemas de pastagem e a infiltração de água, além de serem importantes no armazenamento de carbono (MEI et al., 2018) e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (ZHENG et al., 2018); cuja magnitude é influenciada por sua área, manejo e propriedades abióticas do ecossistema (KIZEKOVÁ et al., 2018).

1.3.4. Serrapilheira da pastagem

A serapilheira refere-se à camada de resíduos depositada sobre o solo proveniente da senescência e/ou abscisão foliar de plantas que não foram consumidas pelos animais, incluindo também galhos, raízes e outras partes constituintes (DUBEUX Jr et al., 2006). Essa camada é responsável por armazenar quantidades expressivas de nutrientes (VENDRAMINI, DUBEUX Jr e SILVEIRA, 2014), os quais retornarão ao solo por meio da decomposição efetuada por microrganismos e pela microfauna edáfica (CORREIA e ANDRADE, 2008). As frações mais importantes envolvidos na ciclagem de nutrientes em sistemas forrageiros (pastagens) são: i. matéria orgânica do solo (MOS), ii. biomassa de plantas vivas, iii. resíduos de plantas (serrapilheira) e iv. excrementos de animais (VENDRAMINI et al., 2014). Entretanto, a deposição ou distribuição da serapilheira sobre o solo dos ecossistemas de pastagens, é mais homogênea em relação aos excrementos animais (VENDRAMINI et al., 2007).

Os resíduos vegetais e animais depositados sobre o solo, numa pastagem são considerados as principais vias de retorno de nutrientes ao sistema (VENDRAMINI et al., 2007). O fluxo de nutrientes na pastagem é regulado por fatores bióticos e abióticos, entre os abióticos se destacam: precipitação pluvial, temperatura e relevo. Vale ressaltar a importância da umidade neste processo, tendo em vista que a disponibilidade de água no solo é responsável pela maior ou menor atuação da atividade microbiana, bem como pela translocação e absorção de nutrientes pelos vegetais (CORREIA e ANDRADE, 2008).

Avaliações realizadas por Silva et al. (2007) indicaram maior aporte de serapilheira na estação seca em contraste com a estação chuvosa. Isso ocorre porque a estação seca é o período de acúmulo do resíduo, que será decomposto durante a estação

chuvosa, essa dinâmica repete-se em ciclos regulares de acúmulo e decomposição da serrapilheira no ecossistema, sendo controlada pela umidade do solo.

A dinâmica da serrapilheira em pastagens tropicais foi relatada nos trabalhos de Rezende et al. (1999), Cantarutti et al. (2002) e Boddey et al. (2004). Nas pastagens estudadas por esses autores, os animais consumiram somente 30% da forragem disponível, assim, o retorno dos nutrientes, em especial N, para o solo, via serrapilheira, foi maior que pelo esterco. Xavier et al. (2011) obtiveram, em monocultura, uma produção de massa seca (MS) da serrapilheira de braquiária (*Urochloa decumbens* cv. Basilisk) de 16.262 kg ha⁻¹ por ano; Rezende et al. (1999) encontraram em pastagens de *U. humidicola*, no sul da Bahia, uma quantidade de MS da serrapilheira depositada no solo, variando entre 15.000 e 18.000 kg ha⁻¹ por ano.

Os aspectos qualitativos da serrapilheira depositada no solo estão diretamente ligados ao controle dos fluxos biogeoquímicos dos nutrientes (DUBEUX Jr et al., 2007). Uma das principais causas da perda de produtividade em pastagens é a baixa disponibilidade de nitrogênio (N) do solo, em razão da alta relação C:N da serrapilheira, depositada pela braquiária (BODDEY et al., 2003), e das altas taxas de lotação das pastagens (BODDEY et al., 2004; PEREIRA et al., 2009).

A relação C:N é um dos indicadores mais importantes da qualidade da serrapilheira, resíduos com baixa relação C:N tem maior decomposição e consequentemente, maior taxa de mineralização de nitrogênio para os vegetais (XAVIER et al., 2011). Outros fatores, além da relação C:N, devem ser considerados na determinação das taxas de mineralização de nitrogênio, como teor de nitrogênio, de lignina, de polifenóis e as formas de nitrogênio presentes nos resíduos (CARNEIRO et al., 2013).

A constante de decomposição da serrapilheira (k) de *Urochloa decumbens* determinada por Xavier et al., (2011) foi de 0,0238 g g⁻¹ por dia, o que corresponde a uma meia-vida, tempo para decomposição de metade da MS, de 35 dias. Em pastagens de *U. humidicola*, após correção do solo, essa taxa foi de 0,097 g g⁻¹ por dia (REZENDE et al., 1999). A taxa de liberação do N expresso em termos de meia-vida da serrapilheira, da pastagem em sistema silvipastoril, foi de 46 dias e não diferiu significativamente do valor de 42 dias obtido em sistema de monocultivo de *Urochloa decumbens* (XAVIER et al., 2011).

De acordo com Araújo et al. (2011), a conversão da floresta em pastagens de *Urochloa brizantha*, aumentou significativamente os estoques de carbono no solo, principalmente nas camadas superficiais das pastagens mais antigas (10 e 20 anos de utilização), devido a contribuição do sistema radicular das gramíneas e dependendo das

condições de clima, solo e manejo. No entanto, vale salientar que a pastagem é uma cultura extrativista, e a entrada de carbono no sistema não compensa as saídas de nutrientes e os benefícios ecossistêmicos de uma floresta.

Os teores e a dinâmica do carbono em função de diferentes sistemas de manejo do solo foram avaliados por Salton et al. (2011), que observaram que as pastagens apresentaram os maiores valores nas taxas de acúmulo e nos estoques de carbono em comparação com os sistemas exclusivos de lavouras anuais.

Entretanto, Souza et al. (2009) avaliando os efeitos de três níveis de intensidade de pastejo (10, 20 e 40 cm) sobre os estoques de carbono orgânico e de nitrogênio total em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto, observaram que só houve um aumento considerável desses estoques nos tratamentos com menores intensidades de corte (20 e 40 cm). Nos tratamentos com a menor altura de corte (10 cm), obteve-se drástica redução nos teores de carbono e dos nutrientes, bem como redução na qualidade da matéria orgânica do solo, aumento na decomposição da serapilheira e na emissão de CO₂ do solo para a atmosfera (KUZYAKOV, 2006).

1.3.5. Efluxo de CO₂ do solo

De acordo com Costa et al. (2008) o balanço de carbono (C) no solo é condicionado pela relação entre as adições de C fotossintetizado pela planta (parte aérea e raízes) a as saídas de C para a atmosfera proveniente da oxidação microbiana do C orgânico à CO₂.

O dióxido de carbono (CO₂) é produzido facilmente nos primeiros 10 cm da superfície do solo, por meio da atividade microbiana, através da decomposição aeróbica da matéria orgânica, e respiração do sistema radicular das plantas (D'ANDRÉA et al., 2010).

O termo "respiração" se divide em dois: "respiração autotrófica" (CO₂ liberado diretamente pelas plantas como produto de sua própria atividade metabólica) e "respiração heterotrófica" (CO₂ espirado por micro, meso e macroorganismos, à medida que consomem e quebram matéria orgânica) (MALHI, 2009; SUN, LEI e CHANG, 2019). Essa evolução do CO₂ proveniente da atividade heterotrófica ocorre durante a oxidação aeróbica de compostos orgânicos (HANSON et al., 2000).

Em pastagens a contribuição da respiração autotrófica para a respiração total do solo, geralmente, varia de 17% a 40% e a contribuição da respiração heterotrófica varia de 60-83% da emissão (RAICH e TUFEKCIOGLU, 2000). Entretanto isso depende da condição do solo e da estação do ano e por isso Sun, Lei e Chang (2019) obtiveram

contribuição média de respiração heterotrófica (Rh) para a respiração total do solo (Rs) de 47,7 a 52,8% em função da condição do solo.

Dentre os fatores bióticos e abióticos que controlam o efluxo de CO₂ do solo; destacam-se a disponibilidade de água e a temperatura (VINCENT et al., 2006). A temperatura e a umidade do solo são os principais parâmetros que exercem forte influência no processo de produção e transporte do CO₂ à atmosfera, como também participa no controle de tais processos em intensidade e frequência (VARGAS et al., 2014). A ocorrência das chuvas influencia na dinâmica entre o movimento de água e gases no interior do solo, com o aumento do teor de água há um favorecimento na saída de elevadas quantidades de CO₂, devido à ocupação dos espaços porosos pela água (VARELLA et al., 2004; SMART e PEÑUELAS, 2005).

Além do teor de umidade, a textura do solo também apresenta forte influência nas variações das emissões de CO₂ (CARBONELL-BOJOLLO et al., 2012; BALL, 2013; FÓTI et al., 2016). Onde as características texturais condicionam as diferenças nos teores de água no solo. Os gases e a água competem pelo espaço poroso do solo, pois quando esses poros encontram-se parcialmente ou totalmente preenchidos por água, ocorre uma redução na disponibilidade de gases para os microorganismos, e consequentemente há uma redução na sua respiração (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

Em encostas há variações nos atributos físicos e químicos do solo em função das distintas posições do relevo, devido à maior susceptibilidade aos efeitos da erosão hídrica que carreiam sedimentos das posições mais altas para as posições mais baixas do relevo, pela diminuição da taxa de infiltração e aumento da velocidade de escoamento superficial da água (SANTOS et al., 2009; SANTOS e SALCEDO, 2010). Além disso, o relevo é um fator determinante que apresenta uma forte influência nos valores da emissão de CO₂ do solo (BRITO et al., 2009; KONDA et al., 2010), bem como a cultura que está implantada.

Uma cultura que apresenta grande importância na estabilização de carbono são as pastagens, pois as mesmas possuem um sistema radicular que aporta carbono ao solo, são ricas em carbono orgânico, e são importantes na fixação de CO₂ (FRANK et al., 2002). As pastagens perenes fornecem ao solo maiores aportes de resíduos vegetais na camada de 0-20 cm (ROZANE et al., 2010).

Isso devido a cultura ser perene e possuir alta relação C/N, o que lhe confere tempo de decomposição e persistência da matéria orgânica mais prolongado (CASTELLANO et al., 2015; QIAO et al., 2016), em uma condição de estabilidade. Entre os ecossistemas, as pastagens são consideradas fundamentais no sequestro de carbono atmosférico, por fazerem parte de grandes áreas plantadas no território nacional.

As pastagens são uma das vegetações mais representativas do planeta, contabilizando cerca de 20% da área terrestre global e, portanto, a resposta das pastagens à mudança climática desempenha um papel fundamental no equilíbrio do carbono terrestre (ZHENG et al., 2018). Elas são importantes no armazenamento de carbono associado à matéria orgânica e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, mas também contribuem para essas emissões pelo processo de expiração radicular (KIZEKOVÁ et al., 2018; ZHENG et al., 2018).

O Brasil possui cerca de 180 milhões de hectares ocupados por pastagens cultivadas e nativas (MARTUSCELLO et al., 2009). Mas, informações compiladas em Dias-Filho (2011) indicam que entre 50% e 70% dessas áreas de pastagens do Brasil apresentariam algum grau de degradação.

A recuperação de pastagens degradadas pode ser uma das alternativas de sequestro de carbono, reduzindo assim uma quantidade de até 104,5 milhões de toneladas de CO₂eq (Carbono equivalente), que poderiam contribuir para reduzir a emissão de gases que provocam o efeito estufa (LEITE, 2010). Portanto, as idades das plantações influenciam significativamente na respiração autotrófica do solo, com menor emissão na vegetação mais jovem (MATYSEK et al., 2018).

1.3.6. Influência do relevo nas propriedades do solo e produção da pastagem

Estudar a interação entre topografia, umidade do solo e dinâmica da vegetação é importante para identificar os impactos nos serviços ecossistêmicos, principalmente em solos com variabilidade espacial do relevo (HAWTHORNE e MINIAT, 2018). Topossequências com o mesmo tipo de solo podem apresentar heterogeneidades significativas nas propriedades desse solo dentro de cada posição topográfica, em função da citada variabilidade espacial (MARTINI et al., 2015).

A variação de cotas e a diversidade de formas de relevo influenciam na drenagem e na presença de espécies vegetais, assim como nas possibilidades de uso da terra. A retirada da cobertura vegetal expõe o solo aos processos erosivos. A erosão pode ser mais marcante na encosta e aumentar de intensidade com o aumento da declividade (FARIA et al., 2010). Os solos de posições inferiores da vertente sempre apresentam maiores valores de umidade, de infiltração (GREGO et al., 2011) e de fertilidade (ZILVERBERG et al., 2018) estando às diferenças estritamente relacionadas às cotas topográficas, a estrutura e a textura do solo.

Em pastagens sobre solo que apresentam algum grau de compactação, a posição do relevo favorece a erosão hídrica, pois diminui a taxa de infiltração e aumenta a

velocidade de escoamento superficial da água, carreando sedimentos e nutrientes até as posições mais baixas do relevo (GALVÃO, SALCEDO e SANTOS, 2005; SANTOS et al., 2009; ZILVERBERG et al., 2018), modificando assim a textura (SANTOS et al., 2002; SANTOS e SALCEDO, 2010; LIMA et al., 2015), a fertilidade e o armazenamento de água do solo (LIMA et al., 2015). Sobretudo nas vertentes de bacias hidrográficas, a erosão hídrica é identificada como a principal causa do empobrecimento do solo agrícola (SANTOS, G., et al., 2010).

A velocidade de escoamento da água depende de vários fatores, tais como o comprimento, grau de inclinação, forma da encosta e cobertura vegetal (CASTRO et al., 2006; SILVA e SANTOS, 2009; SANTOS, G., et al., 2010). Essa velocidade determina a quantidade e tipo de sedimentos que serão carregados pela água, atuando diferencialmente na modificação da fertilidade do solo ao longo da encosta. Além da enxurrada superficial de sedimentos, há também fluxos subsuperficiais de solução do solo, que levam junto formas de nutrientes mais solúveis como nitrato, amônio e potássio.

Outros, como o ânion ortofosfato, também podem ser transportados por este mecanismo a depender da textura do solo (GALVÃO, SALCEDO e OLIVEIRA, 2008), e são perdidos, com maior facilidade, junto com as partículas coloidais do solo onde estão adsorvidos. A quantidade de fósforo perdido pelo carregamento varia com o tamanho das partículas transportadas, sendo maiores as perdas quanto menores forem as partículas (BARBOSA et al., 2009). Estas perdas de íons do solo podem ser mais intensificadas em função do sistema de manejo adotado (BERTOL et al., 2007).

A exploração de pastagens em áreas de relevo ondulado possibilita o carregamento de sedimentos das posições superiores (ombro) das encostas até as inferiores (pedimento), resultando em perdas de solo e pasto (LIMA et al., 2008). Fato este, confirmado por Santos et al. (2002), Galvão, Salcedo e Santos (2005) e Brehm (2010), que verificaram maiores teores de areia na posição do pedimento, em comparação, aos teores das posições do ombro e da meia encosta.

No entanto, Silva et al. (2018) relataram que o terço superior (ombro) apresentou os menores teores de argila e as características químicas não foram influenciadas pela posição na encosta, mas sim pela forma da encosta, pois na pedoforma côncava, nas áreas de textura argilosa, obtiveram-se menores valores de soma de bases trocáveis e de carbono, quando comparada à pedoforma convexa, de mesma classe textural.

Em áreas de relevo com topossequências côncavas é observada maior variabilidade nos atributos do solo e planta do que em áreas de relevo lineares, independentemente do histórico de manejo (MONTANARI et al., 2005). Quando se

trabalha em escala de microbacia hidrográfica, observa-se que a atividade exploratória (agrícola ou pecuária) baseia-se no relevo, ou seja, o uso do solo é função da sua posição topográfica. Isso ocorre porque as variações em declividade afetam o tipo de solo, absorção e a capacidade de armazenamento de água (LIMA et al., 2015).

O balanço das taxas de adição e de perdas de carbono orgânico por erosão, lixiviação e, sobretudo, mineralização determinam o teor da matéria orgânica do solo (MOS) (BAYER e MIELNICZUK, 2008), que é importante na função e na preservação do agroecossistema, sendo crucial na sustentabilidade da agricultura (DENEFF et al., 2007), por contribuir na melhoria das condições físicas, riscos de erosão, retenção de água e na ciclagem de nutrientes na forma orgânica (MARIAM et al., 2008).

O declínio do carbono do solo resultante da mineralização de compostos orgânicos é intensificado em áreas de relevo ondulado, nas quais se acentuam os processos erosivos (GALVÃO, SALCEDO e SANTOS, 2005). Estes se estabelecem com intensidade variável em função do grau de cobertura vegetal, nas diversas posições das topossequências (WANG et al., 2008; WANG et al., 2013). Em solos agrícolas em paisagens onduladas (como nas encostas), os estoques de carbono orgânico do solo dependem da posição na paisagem (ZILVERBERG et al., 2018).

Os nutrientes do solo também são influenciados significativamente pelo tipo de vegetação, umidade e textura do solo (WU et al., 2016; TIAN et al., 2017; TIAN et al., 2018). Tian et al. (2018) observaram que os teores de C, N, P e K em pastagens são afetados pelo relevo (ARTUR et al., 2014). O microrrelevo influencia na direção do fluxo de água e induz à variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, determinando áreas com características diferenciadas em relação ao pH e à disponibilidade de nutrientes; o que implica na necessidade de técnicas de manejo diferenciadas para a implantação de culturas (ARTUR et al., 2014).

A pastagem apresenta heterogeneidade na morfologia do dossel em função da distribuição espacial da fertilidade do solo, com produção de matéria seca mais elevada no topo e atingindo a menor produção no ombro da topossequência (OLIVEIRA et al., 2015). A fertilidade do solo na topossequência, foi baixa para as três posições estudadas por Santos et al. (2009) com pH (no ombro = 5,11, encosta linear = 5,25 e pedimento = 5,4); teores de cálcio e magnésio no ombro = 1,92 cmolc kg⁻¹ e 1,25 cmolc kg⁻¹; na encosta linear = 1,8 cmolc kg⁻¹ e 1,17 cmolc kg⁻¹; e no pedimento = 1,67 cmolc kg⁻¹ e 0,74 cmolc kg⁻¹; respectivamente. Com uma deficiência generalizada de P, cerca de 80% das amostras apresentaram teores baixos de P, enquanto 70% teores médios de K (SANTOS, SALCEDO e GALVÃO, 2008).

A caracterização do solo em encostas, realizada por Santos et al. (2009), indicou que mais de 90% das amostras no ombro e 88% de meia encosta apresentaram baixos níveis de P ($0-7,7 \text{ mg kg}^{-1}$), fato também relatado por Fraga e Salcedo (2004). No pedimento, essa proporção foi de 78%. No entanto, com relação ao K, tanto no ombro (71%), quanto na meia encosta (53%) e no pedimento (68%), a maioria das amostras apresentaram níveis médios de K ($0,10-0,29 \text{ cmolc kg}^{-1}$).

1.3.7. Nitrogênio, Fósforo e Potássio na Produção de Forragem

O uso intensivo das pastagens por longo tempo, sem a reposição de nutrientes e sem a recuperação da capacidade produtiva do pasto, resultam perda de produção (OLIVEIRA, TRIVELIN e OLIVEIRA, 2003; CORRÊA et al., 2007) e a um estado de degradação (PORQUEDDU et al., 2016; SOUZA et al., 2016; SILVA et al., 2018). Nesse sentido, a adubação das pastagens perenes e a recuperação das pastagens degradadas são a principal alternativa para aumentar a oferta de forragem (MOTTA et al., 2017).

As plantas são responsivas aos incrementos nos teores de fósforo, nitrogênio e potássio do solo, seja de forma isolada ou combinada (SARDANS e PEÑUELAS, 2015; WILLIAMSON et al., 2016; TIAN et al., 2018). Assim, a absorção de nutrientes do solo em quantidades adequadas, propicia aumento na produção de matéria seca do pasto (SANTOS et al., 2007).

Os baixos teores de Carbono (C), Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) no solo, podem limitar a produtividade em pastagens plantadas (TIAN et al., 2018), ademais, os teores de C e N precisam estar relacionados aos de P, para que haja um favorecimento à atividade microbiana e da planta (DELGADO-BAQUERIZO et al., 2013). A concentração de N do solo é um dos principais fatores reguladores do crescimento das plantas e aumento na eficiência de absorção de N pelas mesmas (YUAN et al., 2011; XIAO-LIN et al., 2013).

Depois da água, o N é considerado o principal nutriente para aumento da produção de forragem (SARMENTO et al., 2008), e sua deficiência tem sido apontada como uma das principais causas de degradação das pastagens (BOMFIM-SILVA e MONTEIRO, 2010). O K é o segundo nutriente mais abundante em tecidos de plantas fotossintetizantes, após o N (XU et al., 2018), com papel fundamental na eficiência e economia do uso da água pelas plantas (SARDANS e PEÑUELAS, 2015). K é tão limitante quanto N e P (DIJKSTRA et al., 2016) para produtividade de plantas em ecossistemas terrestres.

O P é outro nutriente que em deficiência no solo, limita à produção das plantas forrageiras (IEIRI et al., 2010), pois é responsável pelo maior crescimento do sistema

radicular, perfilhamento, e maior produtividade de forragem, tornando-se de fundamental importância na exploração pecuária, principalmente com teores adequados de N no solo, que proporciona um melhor aproveitamento de P pelas plantas (BELARMINO et al., 2003; PATÊS et al., 2008; ZHAN et al., 2016; XU et al., 2018).

A deposição de N atmosférico no solo exerce um forte impacto no ciclo do K no ecossistema, podendo diminuir a sua disponibilidade no solo (TIAN et al., 2018). A redução da disponibilidade de K do solo como consequência da deposição do N atmosférico, deve-se às grandes perdas de K por lixiviação que causam desequilíbrios nutricionais às plantas (SARDANS e PEÑUELAS, 2015). Por isso, além da importância reconhecida de P e N na produção vegetal, também deveria ser dada mais importância ao K, principalmente em ecossistemas áridos e semiáridos.

As pastagens brasileiras, em sua maioria, vêm sendo exploradas ao longo dos anos dentro de um sistema extrativista, utilizando-se da fertilidade natural dos solos para implantação de forrageiras e, à medida que esta fertilidade vai diminuindo, o potencial produtivo da forrageira instalada é também diminuído (BACKES et al., 2017, SILVA et al., 2018) provocando uma queda na capacidade de suporte de animais nessas áreas (PEREIRA et al., 2013), levando à degradação da pastagem e do solo.

Na Paraíba, a pecuária é uma das principais alternativas para a renda dos pequenos agricultores, que vivem de produtos da agricultura familiar. No Estado, os solos destinados às pastagens são os solos inadequados ao cultivo agrícola e em áreas de encostas (SANTOS e SALCEDO, 2010). Além disso, a oferta dos nutrientes em áreas de microbacia está fortemente associada com as posições no relevo (TIAN et al., 2018), usos da terra e classes texturais (GALVÃO, SALCEDO e SANTOS, 2005; SANTOS et al., 2009; WU et al., 2016; TIAN et al., 2017; TIAN et al., 2018).

A influência do uso e da posição do perfil no relevo na fertilidade de solos em áreas de encosta foi avaliada por Santos et al. (2009), que observaram que mais de 90% das amostras no ombro, 88% de meia encosta e de 78% no pedimento apresentaram baixos níveis de P ($0-7,7 \text{ mg kg}^{-1}$). Além disto, as encostas com uso agropecuário apresentaram menores teores de C e N, em relação às áreas com mata, porém apresentam maiores teores de P onde ocorre a adubação orgânica com esterco bovino.

1.4. REFERÊNCIAS

- AIELLO, R.; BAGARELLO, V.; BARBAGALLO, S.; CONSOLI, S.; DI PRIMA, S.; GIORDANO, G.; IOVINO, M. An assessment of the Beerkan method for determining the hydraulic properties of a sandy loam soil. **Geoderma**, v. 235–236, p. 300–307, 2014.
- ALAGNA, V.; BAGARELLO, V.; PRIMA, S. DI; GIORDANO, G.; IOVINO, M. Testing infiltration run effects on the estimated water transmission properties of a sandy-loam soil. **Geoderma**, v. 267, p. 24–33, 2016.
- ADAMS, H. R.; BARNARD, H. R.; LOOMIS, A. K. Topography alters tree growth-climate relationships in a semi-arid forested catchment. **Ecosphere**, v.5, 2014.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; SÁ MENDONÇA, E.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta-pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazonica**, v.41, n.1, p.103-114, 2011.
- ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C.; ROMERO, R. E.; SILVA, M. V.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.2, p.141-149, 2014.
- BACKES, C.; SANTOS, A. J. M.; RODRIGUES, L. M.; TEODORO, A. G.; RIBON, A. A.; BÔAS, R. L. V.; PEREIRA, L. M.; FRANCO, Y. M. Recovery of a dystrophic Red Latosol (Oxisol) and pasture as a function of gypsum in the Cerrado biome. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 46, n. 4, p. 286–295, 2017.
- BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; IOVINO, M. Estimating saturated soil hydraulic conductivity by the near steady-state phase of a Beerkan infiltration test. **Geoderma**, v.303, p.70–77, 2017.
- BALL, B. C. Soil structure and greenhouse gas emissions: A synthesis of 20 years of experimentation. **European Journal of Soil Science**, West Sussex, v. 64, n. 3, p. 357–373, 2013.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª edição revisada e atualizada. Porto Alegre. Metrópole. 2008, p.7-18.
- BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; LUCIANO, R. V.; GONZALEZ, A. P. Phosphorus losses in water and sediments in runoff of the water erosion in oat and vetch crops seed in contour and downhill. **Soil and Tillage Research**, 106: 22-28, 2009.
- BELARMINO, M. C. J.; PINTO, J. C.; ROCHA, G. P.; FURTINI NETO, A. E.; MORAIS, A. R. de. Altura de perfilho e rendimento de matéria seca de capim Tanzânia em função de diferentes doses de superfosfato simples e sulfato de amônio. **Ciência e Agrotecnologia**, v.27, n.4, p.879-885, 2003.
- BERDANIER, A. B.; CLARK, J. S. Multi-year drought-induced morbidity preceding tree death in southeastern US forests. **Ecological Applications**, v.26, n.1, p.17-23, 2016.

BERTOL, I.; ENGEL, F. L.; MAFRA, A. L.; BERTOL, O. J.; RITTER, S. R. Phosphorus, Potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. **Soil and Tillage Research**, 94: 142-150, 2007.

BEVINGTON, J.; PIRAGNOLO, D.; TEATINI, P.; VELLIDIS, G.; MORARI, F. On the spatial variability of soil hydraulic properties in a Holocene coastal farmland. **Geoderma**, v. 262, p. 294–305, 2016.

BODDEY, R. M.; MACEDO, R.; TARRÉ, R. M.; FERREIRA, E.; OLIVEIRA, O. C.; REZENDE, C. D. P.; CANTARUTI, R. B.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Nitrogen cycling in *Brachiaria* pastures: the key to understanding the process of pasture decline. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v.103, p.389-403, 2004.

BODDEY, R. M.; XAVIER, D. F.; ALVES, B. J.; URQUIAGA, S. Brazilian agriculture: the transition to sustainability. **Journal of Crop Production**, v.9, p.593-621, 2003.

BONFIM-SILVA, E. M.; MONTEIRO F. A. Nitrogênio e enxofre na adubação e em folhas diagnósticas e raízes do capim braquiária em degradação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, n.8, p.1641-1649, 2010.

BREHM, M. A. da S. **Estabilidade e distribuição do tamanho de agregados em duas topossequências sob pastagem com diferentes níveis de conservação**. 2010, 44 p.il.

BRITO, L. D. F.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; LA SCALA JÚNIOR; N. Soil CO₂ emission of sugarcane field as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 1, p. 77–83, 2009.

CANTARUTTI, R. B.; TARRÉ, R.; MACEDO, R.; CADISCH, G.; REZENDE, C. P.; PEREIRA, J. M.; et al. The effect of grazing intensity and the presence of a forage legume on nitrogen dynamics in *Brachiaria* pastures in the Atlantic Forest region of the south of Bahia, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.64, p.257-271, 2002.

CARNEIRO, W. J. D. O.; SILVA, C. A.; MUNIZ; J. A.; VILLELA SAVIAN, T. Mineralização de nitrogênio em latossolos adubados com resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.715-725, 2013.

CARBONELL-BOJOLLO, R. M.; REPULLO-RUIBÉRRIZ, T. M. A.; RODRÍGUEZ-LIZANA, A.; ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R. Influence of soil and climate conditions on CO₂ emissions from agricultural Soils. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 223, n. 6, p. 3425–3435, 2012.

CASTELLANO, M. J.; MUELLER, K. E.; OLK, D. C.; SAWYER, J. E.; SIX, J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization and the carbon saturation concept. **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3200-3209, 2015.

CASTELLINI, M.; DI PRIMA, S.; IOVINO, M. An assessment of the BEST procedure to estimate the soil water retention curve: A comparison with the evaporation method. **Geoderma**, v.320, p.82–94, 2018.

CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30: 339-352, 2006.

CORRÊA, L. de A.; CANTARELLA, H.; PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.; FREITAS, A. R. de; SILVA, A. G. de. Efeito de fontes e doses de nitrogênio na produção e qualidade da forragem de capim-coastcross. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, p.763-772, 2007.

CORREIA, M.E.F.; ANDRADE, A.G. **Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes**. In: Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2ª edição, revisada e atualizada. Porto Alegre. Metrópole, p.137-154, 2008.

COSTA, F. D. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.1, p.323-332, 2008.

D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; SILVA, C. A. Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta nativa. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, n.62, p.85-92, 2010.

DELGADO-BAQUERIZO, M.; MAESTRE, F. T.; GALLARDO, A.; BOWKER, M. A.; WALLENSTEIN, M. D.; QUERO, J. L.; et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. **Nature**, v. 502, p.672-676, 2013.

DENEF, K.; ZOTARELLI, L.; BODDEY, R.M.; SIX, J. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. **Soil Biology & Biochemistry**, v.39, p.1165-1172, 2007.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 4. ed. rev., atual. e ampl. Belém-PA, 2011.

DIJKSTRA, F. A.; CARRILLO, Y.; ASPINWALL, M. J.; MAIER, C.; CANARINI, A.; TAHAEI, H.; et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies of four tree species in response to variable water and nutrient supply. **Plant Soil**, v.406, p.187-199, 2016.

DI PRIMA, S.; BAGARELLO, V.; LASSABATERE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; BAUTISTA, I.; BURGNET, M.; CERDÀ, A.; IOVINO, M.; PROSDOCIMI, M. Comparing Beerkan infiltration tests with rainfall simulation experiments for hydraulic characterization of a sandy-loam soil. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 20, p. 3520–3532, 2017.

DYMOND, S. F.; BRADFORD, J. B.; BOLSTAD, P. V.; KOLKA, R. K.; SEBESTYEN, S. D.; DESUTTER, T. M. Topographic, edaphic, and vegetative controls on plant-available water. **Ecohydrology**, v. 10, n. 8, p. 1–12, 2017.

DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SOLLENBERGER, L. E.; MATHEWS, B. W.; SCHOLBERG, J. M.; SANTOS, H. Q. Nutrient cycling in warm-climate grasslands. **Crop Science**, v.47, n.3, p.915-928, 2007.

DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; LIRA, M. D. A.; SANTOS, M. D.; CUNHA, M. D. Fluxo de nutrientes em ecossistemas de pastagens: impactos no ambiente e na produtividade. **Simpósio sobre o Manejo da Pastagem**, v.23, p.439-506, 2006.

EBERBACH, P. L.; BURROWS, G. E. The transpiration response by four topographically distributed eucalyptus species, to rainfall occurring during drought in south eastern Australia. **Physiologia Plantarum**, v.127, p.483-493, 2006.

ELLIOTT, K. J.; MINIAT, C. F.; PEDERSON, N.; LASETER, S. H. Forest tree growth response to hydroclimate variability in the southern Appalachians. **Global Change Biology**, v.21, p.4627-4641, 2015.

EUCLIDES, V. P. B.; CARDOSO, E. G. C.; MACEDO, M. C. M; OLIVEIRA, M. P. Consumo Voluntário de *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob Pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 29 (6): 2200-2208, 2000.

ELLIOTT, K. J.; MINIAT, C. F.; PEDERSON, N.; LASETER, S. H. Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.20, p.3309-3323, 2016.

FANG, X.N.; et al. Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.20, p.3309-3323, 2016.

FARIA, A. F. G.; SANTOS, A. C.; SANTOS, T. M.; FILHO, F. B. Influência do manejo do solo nas propriedades químicas e físicas em topossequência na Bacia do Rio Araguaia, estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:517-524, 2010.

FÓTI, S.; BALOGH, J.; HERBST, M.; PAPP, M.; KONCZ, P.; BARTHA, S.; et al. Meta-analysis of field scale spatial variability of grassland soil CO₂ efflux: Interaction of biotic and abiotic drivers. **Catena**, Amsterdam, v.143, p.78-89, 2016.

FRANK, A. B. Carbon dioxide fluxes over grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains. **Environmental Pollution**, v.116, n.3, 39-403, 2002.

FRAGA, V. S.; SALCEDO, I. H. Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, n.1, p.215-224, 2004.

GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; SANTOS, A. C. Frações de carbono e nitrogênio em função da textura, do relevo e do uso do solo na Microbacia do agreste em vaca brava (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:955-962, 2005.

GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.1, p.99-105, 2008.

GAO, L.; SHAO, M. A. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. **Catena**, v.95, p.24-32, 2012.

GREGO, C. R.; COELHO, R. M.; VIEIRA, S. R. Critérios morfológicos e taxonômicos de Latossolo e Nitossolo validados por propriedades físicas mensuráveis analisadas em parte pela geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:337-350, 2011.

HANSON, P. J.; EDWARDS, N. T.; GARTEN, C. T.; ANDREWS, J. A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. **Biogeochemistry**, v. 48, n. 1, p. 115–146, 2000.

HAWTHORNE, S.; MINIAT, C.F. Topography may mitigate drought effects on vegetation along a hillslope gradient. **Ecohydrology**, v.11, n.1825, 2018.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y.; CUENCA, R.; ROSS, P. J.; STEENHUIS, T. S. **Scaling of the Richards equation and its applications to watershed modeling**. In: SPOSITO, G., ed. Scale dependence and scale invariance in hydrology. Cambridge, Cambridge University Press, p.190-230, 1998.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. Elsevier Academic Press, Amsterdam, 494p., 2004.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário (2017)**. Brasil. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/24/76693> > Acesso em abril de 2019.

IEIRI, A. Y.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S. Fontes, doses e modos de aplicação de fósforo na recuperação de pastagem com *Brachiaria*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 5, p. 1154-1160, 2010.

IOVINO, M.; CASTELLINI, M.; BAGARELLO, V.; GIORDANO, G. Using static and dynamic indicators to evaluate soil physical quality in a Sicilian area. **Land Degrad.** v.27, p.200-210, 2016.

IVANOV, V. Y.; FATICHI, S.; JENERETTE, G. D.; ESPELETA, J. F.; TROCH, P. A.; HUXMAN, T. E. Hysteresis of soil moisture spatial heterogeneity and the ‘homogenizing’ effect of vegetation. **Water Resources Research**, v.46, n.9, 2010.

KIZEKOVÁ, M.; HOPKINS, A.; KANIANSKA, R.; MAKOVNÍKOVÁ, J.; POLLÁK; PÁLKA, B. Changes in the area of permanent grassland and its implications for the provision of bioenergy: Slovakia as a case study. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 1, p. 218–232, 2018.

KONDA, R.; OHTA, S.; ISHIZUKA, S.; HERIYANTO, J.; WICAKSONO, A. Seasonal changes in the spatial structures of N₂O, CO₂, and CH₄ fluxes from *Acacia mangium* plantation soils in Indonesia. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 42, n. 9, p. 1512–1522, 2010.

KUZYAKOV, Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 38, n. 3, p. 425-448, 2006.

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA UGALDE, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, n.2, p.521-532, 2006.

LEITE, M. Brasil busca uma nova cara. In: O peso da agropecuária no clima. **Revista Unesp ciência**, v.1, n.4, 2010.

LI, X.; SHAO, M.; JIA, X.; WEI, X. Landscape-scale temporal stability of soil water storage within profiles on the semiarid Loess Plateau of China. **Journal Soils Sediments**, v.15, p.949-961, 2015a.

LI, X.; SHAO, M. A.; JIA, X.; WEI, X.; HE, L. Depth persistence of the spatial pattern of soil-water storage along a small transect in the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v.529, p.685-695, 2015b.

LI, X.; SHAO, M. A.; JIA, X.; WEI, X. Profile distribution of soil-water content and its temporal stability along a 1340-m long transect on the Loess Plateau, China. **Catena**, v.137, p.77-86, 2016.

LIU, X.; HE, Y.; ZHANG, T.; ZHAO X.; LI, Y.; et al. The response of infiltration depth, evaporation, and soil water replenishment to rainfall in mobile dunes in the Horqin Sandy land, Northern China. **Environmental Earth Sciences**, v.73, p.8699-8708, 2015.

LIMA, A. G. **Caracterização de pastagens de *Brachiaria* sp. em relevo movimentado**. 2007, 44 p. il. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2007.

LIMA, A., G.; SALCEDO, I. H.; FRAGA, V. S. **Composição botânica e cobertura do solo de pastagens de *Brachiaria*, em função da forma e posição no relevo**. In: Fertilidade do solo e produção de biomassa no Semi-árido. Ed. universitária da UFPE, Recife, p.89-104, 2008.

LIMA, F. V.; SILVINO, G. S.; SOUZA MELO, R. S.; LIRA, E. C.; RIBEIRO, T. S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.4, p.53-63, 2015.

MA, D.; ZHANG, J.; HORTON, R.; WANG, Q.; LAI, J. Analytical method to determine soil hydraulic properties from vertical infiltration experiments. **Soil Science Society of America Journal**, V.81, N.6, p.1303-1314, 2017.

MACIEL-NETTO, A.; LIMA, L. J. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S.; ANGULO-JARAMILLO, R. Caracterização hidrodinâmica e hidrodispersiva de um Latossolo Amarelo na microrregião do brejo paraibano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:86-96, 2013.

MACKAY, D. S.; AHL, D. E.; EWERS, B. E.; GOWER, S. T.; BURROWS, S. N.; SAMANTA, S.; DAVIS, K. J. Effects of aggregated classifications of Forest composition on estimates of evapotranspiration in a northern Wisconsin forest. **Global Change Biology**, v.8, p.1253-1265, 2002

MALHI, Y.; SAATCHI, S.; GIRARDIN, C.; ARAGÃO, L.E.O.C. The Production, Storage, and Flow of Carbon in Amazonian Forests. In: Amazonia and Global Change, Geophysical Monograph Series, p.355-371, 2009.

MARANHÃO, C.M.A.; BONOMO, P.; PIRES, A. J. V.; COSTA, A., P. R., C.; MARTINS, G. C. F.; CARDOSO, E. O. Características produtivas do capim-braquiária

submetido a intervalos de cortes e adubação nitrogenada durante três estações. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.32, n.4, p.375-384, 2010.

MARIAM, S.H.; COLLINS, H.P.; WRIGHT, S & PAUL, E.A. Fractionation and long-term laboratory incubation to measure soil organic matter dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.72, n. 2, p.370-378, 2008.

MARTINI, E.; WOLLSCHLÄGER, U.; KÖGLER, S.; BEHRENS, T.; DIETRICH, P.; REINSTORF, F.; SCHMIDT, K.; WEILER, M.; WERBAN, U.; ZACHARIAS, S. Spatial and Temporal Dynamics of Hillslope-Scale Soil Moisture Patterns: Characteristic States and Transition Mechanisms. **Vadose Zone Journal**, v. 14, n. 4, p. 0, 2015.

MARTUSCELLO, J. A.; JANK, L.; MARQUES, M.; NETO, G.; LAURA, A.; NORONHA, D.; VIEIRA, F. Produção de gramíneas do gênero *Brachiaria* sob níveis de sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.7, p.183-1190, 2009.

MATYSEK, M.; EVERS, S.; SAMUEL, M. K.; SJÖGERSTEN, S. High heterotrophic CO₂ emissions from a Malaysian oil palm plantations during dry-season. **Wetlands Ecology and Management**, v. 26, n. 3, p. 415–424, 2018.

MEI, X.; ZHU, Q.; MA, L.; ZHANG, D.; LIU, H.; XUE, M. The spatial variability of soil water storage and its controlling factors during dry and wet periods on loess hillslopes. **Catena**, v. 162, p. 333–344, 2018.

MITCHELL, P.J.; BENYON, R.G.; LANE, P.N.J. Responses of evapotranspiration at different topographic positions and catchment water balance following a pronounced drought in a mixed species eucalypt forest, Australia. **Journal of Hydrology**, v.440, p.62-74, 2012.

MONTANARI, R.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; Z. SOUZA, M. de. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.1, p.69- 77, 2005.

MOTTA, P. E. F.; SIQUEIRA, J. O.; RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; CURI, N. *Urochloa decumbens* growth and P uptake as affected by long-term phosphate fertilization, mycorrhizal inoculation and historical land use in contrasting Oxisols of the Brazilian Cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 209–219, 2017.

MOREIRA, F. M. S; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**, 2006.

O'GEEN, A.T.; DAHLGREN, R.A.; SWAROWSKY, A.; TATE, K.W.; LEWIS, D.J.; SINGER, M.J. Research connects soil hydrology and stream water chemistry in California oak woodlands. **California Agriculture**. v.64, n.2, p.78-84, 2010.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. A. S.; SOUZA, E. S.; CORREA, M. M.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, R. M. S.; SILVA FILHO, L. A. Variabilidade espacial de propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico sob pastagem e caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 631–639, 2014.

OLIVEIRA, L. B. T. D.; SANTOS, A. C. D.; LIMA, J. D. S.; NEVES NETO, D. N. Variabilidade espacial das respostas produtivas e morfológicas do capim-Marandu em

função dos atributos químicos e topográficos. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.16, n.4, p.772-783, 2015.

OLIVEIRA, P. P. A.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. Eficiência da fertilização nitrogenada com uréia (^{15}N) em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu associada ao parcelamento de superfosfato simples e cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.613-620, 2003.

PACIFIC, V. J.; MCGLYNN, B. L.; RIVEROS-IREGUI, D. A.; WELSCH, D. L.; EPSTEIN, H. E. Landscape structure, groundwater dynamics, and soil water content influence soil respiration across riparian-hillslope transitions in the Tenderfoot Creek Experimental Forest. Montana. **Hydrological processes**, v.25, p.811-827, 2011.

PATÊS, N. M. da S.; PIRES, A. J. V.; CARVALHO, G. G. P. de; OLIVEIRA, A. C.; FONCÊCA, M. P.; VELOSO, C. M. Produção e valor nutritivo do capim-tanzânia fertilizado com nitrogênio e fósforo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, n.11, p. 1935-1939, 2008.

PENNA, D.; BROCCA, L.; BORGA, M.; DALLA FONTANA, G. Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods. **Journal of Hydrology**, v. 477, p. 55–71, 2013.

PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; FONTANA, A.; DIAS-NETO, A. H.; MIRANDA, L. P. M. Caracterização e classificação de solos em uma topossequência sobre calcário na serra da Bodoquena, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.25-36, 2013.

PEREIRA, J. M.; TARRÉ, R. M.; MACEDO, R.; REZENDE, P. C.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Productivity of *Brachiaria humidicola* pastures in the Atlantic Forest region of Brazil as affected by stocking rate and the presence of a forage legume. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.83, p.179-196, 2009.

PORQUEDDU, C.; ATES, S.; LOUHAICHI, M.; KYRIAZOPOULOS, A. P.; MORENO, G.; DEL POZO, A.; OVALLE, C.; EWING, M. A.; NICHOLS, P. G. H. Grasslands in “Old World” and “New World” Mediterranean-climate zones: Past trends, current status and future research priorities. **Grass and Forage Science**, v. 71, n. 1, p. 1–35, 2016.

QIAO, N.; XU, X.; HU, Y.; BLAGODATSKAYA, E.; LIU, Y.; SCHAEFER, D.; KUZUYAKOV, Y. Carbon and nitrogen additions induce distinct priming effects along an organic-matter decay continuum. **Scientific Reports**, v. 6, n. October 2015, p. 1–8, 2016.

RAICH, J.W.; TUFEKCIOGLU, A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. **Biogeochemistry**, v.48, p.71-90, 2000.

REZENDE, C. D. P.; CANTARUTTI, R. B.; BRAGA, J. M.; GOMIDE, J. A.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; TARRÉ R.; MACEDO, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; CADISCH, G.; GILLER K.E; BODDEY R.M. Litter deposition and disappearance in *Brachiaria* pastures in the Atlantic Forest region of the south of Bahia, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.54, p.99-112, 1999.

RIVERA, D.; LILLO, M.; GRANDA, S. Representative locations from time series of soil water content using time stability and wavelet analysis. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.186, n.12, p.9075-9087, 2014.

RIVEROS-IREGUI, D. A.; MCGLYNN, B. L. Landscape structure control on soil CO₂ efflux variability in complex terrain: Scaling from point observations to watershed scale fluxes. **Journal of Geophysical Research**, v.114, 2009.

ROZANE, D. E.; CENTURION, J. F.; ROMUALDO L. M.; TANIGUCHI, C. A. K.; TRABUCO, M.; ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, v.26, n. 1, p. 24-32, 2010.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. D. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1349-1356, 2011.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M. D.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.4, p.1095-1103, 2009.

SANTOS, A.C.; SALCEDO, I. H. Relevô e fertilidade do solo em diferentes estratos da cobertura vegetal na bacia hidrográfica da represa Vaca Brava, Areia, PB. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.2, p.277-285, 2010.

SANTOS, A. C.; SALCEDO, I. H.; CANDEIAS, A. L. B. Relação entre o relevo e as classes texturais do solo na microbacia hidrográfica de Vaca Brava, PB. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.54, n.1, p.86-94, 2002.

SANTOS, A. C. D.; SALCEDO, I. H.; CANDEIAS, A. L. B; GALVÃO, S. R. D. S. Influência do uso e da posição do perfil no relevo na fertilidade de solos em áreas de encosta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.39, n.1, p.31-37, 2009.

SANTOS, A. C.; SALCEDO, I. H.; GALVÃO, S. R. S. Relações entre uso do solo, relevo e fertilidade do solo em escala de microbacia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.5, p.498-504, 2008.

SANTOS, J. T. D.; ANDRADE, A. P.; SILVA, I. D. F.; SILVA, D. S.; SANTOS, E. M.; SILVA, A. P. G. Atributos físicos e químicos do solo de áreas sob pastejo na micro Região do Brejo paraibano. **Ciência Rural**, v.40, n.12, dez, 2010.

SANTOS, G.G.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.115-123, 2010.

SANTOS, R. S. M., OLIVEIRA, I. P.; MORAIS, R. F.; URQUIAGA, S. C.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria* spp. Em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade em ambiente de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, n.2, p.119-124, 2007.

SANTOS, R. S. M. DOS; OLIVEIRA, I. P. DE; MORAIS, R. F. DE; URQUIAGA, S. C.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria* spp. em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade em ambiente de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 119–124, 2007.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Potassium: a neglected nutrient in global change. **Global Ecology and Biogeography**, v.24, p.261-275, 2015.

SARMENTO, P.; RODRIGUES, L. R. D. A.; LUGÃO, S. M. B.; CRUZ, M. C. P. D.; CAMPOS, F. P. D.; FERREIRA, M. E.; OLIVEIRA, R. F. D. Sistema radicular do *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio adubado com nitrogênio e submetido à lotação rotacionada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, n.1, p.27-34, 2008.

SILVA, A. J.; CUNHA, F. F.; ROQUE, C. G.; SILVA, M. D. T.; RIBEIRO, D. O.; CARBALLAL, M. R. Replacement of liming and NPK fertilization with Turkey litter in degraded areas grown with *Urochloa decumbens*. **Semina: Ciencias Agrarias**, v. 39, n. 2, p. 467-475, 2018.

SILVA, C. J. D.; SANCHES, L.; BLEICH, M. E.; LOBO, F. D. A.; NOGUEIRA, J. D. S. Produção de serrapilheira no cerrado e floresta de transição Amazônia-Cerrado do Centro-Oeste Brasileiro. **Acta Amazonica**, v.37, n.4, p.543-548, 2007.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Influência da cobertura vegetal nos processos hidrossedimentológicos no semiárido do Nordeste, Brasil. **Unioeste Geografia**, v1/2, n. 5, p. 113-125, 2009.

SMART, D. R.; PEÑUELAS, J. Short-term CO₂ emissions from planted soil subject to elevated CO₂ and simulated precipitation. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam v. 28, n. 3, p. 247-57, 2005.

SOUZA, E. D.; ANDRADE, S. E. V. G.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.6, 2009.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.128-135, 2008.

SOUZA, R.; SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C.; S, L.; JOSÉ, R. Balanço hídrico em área de pastagem no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.5, p.449-455, 2015.

SOUZA, F. M.; LEMOS, B. J. M.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; MAGNABOSCO, C. U.; CASTRO, L. M.; LOPES, F. B.; BRUNES, L. C. Introdução de leguminosas forrageiras, calagem e fosfatagem em pastagem degradada de *Brachiaria brizantha*. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.17, n.3, p.355-364, 2016.

SUN, S.; LEI, H.; CHANG, S.X. Drought differentially affects autotrophic and heterotrophic soil respiration rates and their temperature sensitivity. **Biology and Fertility of Soils**, v.55, p.275-283, 2019.

TIAN, L.M.; ZHAO, L.; WU, X.D.; FANG, H.B.; ZHAO, Y.H.; YUE, G.Y.; LIU, G.M.; CHEN, H. Vertical patterns and controls of soil nutrients in alpine grassland: implications for nutrient uptake. **Science of the Total Environment**, v.607, p.855-864, 2017.

TIAN, L.; ZHAO, L.; WU, X.; FANG, H.; ZHAO, Y.; et al. Soil moisture and texture primarily control the soil nutrient stoichiometry across the Tibetan grassland. **Science of the Total Environment**, v.622–623, p.192–202, 2018.

VARGAS, V. P.; CANTARELLA, H.; MARTINS, A. A.; SOARES, J. R.; CARMO, J. B.; ANDRADE, C. A. Sugarcane crop residue increases N₂O and CO₂ emissions under high soil moisture conditions. **Sugar Tech**, New Delhi, v.16, n.2, p.174-179, 2014.

VARELLA, R. F.; BUSTAMANTE, M. M. C.; PINTO, A. S.; KISSELLE, K. W.; SANTOS, R. V.; BURKE, R. A.; ZEPP, R. G.; VIANA, L. T. Soil fluxes of CO₂, CO, NO and N₂O an old pasture and from native savanna in Brazil. **Ecological Applications**, Hoboken, v.14, n.4, p.221-231, 2004.

VENDRAMINI, J.; DUBEUX Jr, J. C.; SILVEIRA, M. L. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.9, n.2, p.308-315, 2014.

VENDRAMINI, J. M. B.; SILVEIRA, M. L. A.; DUBEUX Jr., J. C. B.; SOLLENBERGER L. E. Environmental impacts and nutrient recycling on pastures grazed by cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, 2007.

VINCENT, G.; SHAHRIARI, A. R.; LUCOT, E.; BADOT, P. M.; EPRON, D. Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. **Soil Biology and Biochemistry**, 38, 2527-2535, 2006.

WANG, L.; WANG, Q.; WEI, S.; SHAO, M.; LI, Y. Soil desiccation for loess soils on natural and regrown areas.. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 7, p. 2467–2477, 2008.

WANG, Y.; SHAO, M. A.; LIU, Z.; HORTON, R. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China. **Journal of Hydrology** v.487, p.13-23, 2013.

WILLIAMSON, T. J.; CROSS, W. F.; BENSTEAD, J. P.; GÍSLASON, G. M.; HOOD, J. M.; HURYN, A. D.; JOHNSON, P. W. ; WELTER, J. R. Warming alters coupled carbon and nutrient cycles in experimental streams. **Global Change Biology**, v.22, p.2152-2164, 2016.

WU, X.; ZHAO, L.; FANG, H.; ZHAO, Y.; SMOAK, J. M.; PANG, Q.; DING, Y. Environmental controls on soil organic carbon and nitrogen stocks in the high-altitude arid western Qinghai-Tibetan Plateau permafrost region. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences** v.121, 2016.

XAVIER, D.F.; LÉDO, F.J.S.; PACIULLO, D.S.C.; PIRES, M.F.Á.; BODDEY, R.M. Dinâmica da serapilheira em pastagens de braquiária em sistema silvipastoril e monocultura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1214-1219, 2011.

XIAO-LIN, Y.; ZHU-BO; YI-LING, L. Spatial and Temporal Patterns of Soil Nitrogen Distribution under Different Land Uses in a Watershed in the Hilly Area of Purple Soil, China. **Journal of Mountain Science**, v.10, n.3, p.410-417, 2013.

XU, B.; XU, W.; WANG, Z.; CHEN, Z.; PALTA, J. A.; CHEN, Y. Accumulation of N and P in the Legume *Lespedeza davurica* in Controlled Mixtures with the Grass

Bothriochloa ischaemum under Varying Water and Fertilization Conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1–12, 2018.

YANG, L.; CHEN, L.D.; WEI, W. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions. **Catena**, v.124, p.138-146, 2015.

YUAN, L.; BAO, D. J.; JIN, Y.; YANG, Y. H.; HUANG, J. G. Influence of fertilizers on nitrogen mineralization and utilization in the rhizosphere of wheat. **Plant Soil**, v.343, p.187-193, 2011.

ZHAN, S.; WANG, Y.; ZHU, Z.; LI, W.; BAI, Y. Nitrogen enrichment alters plant N:P stoichiometry and intensifies phosphorus limitation in a steppe ecosystem. **Environmental and Experimental Botany**, v.134, p.21-32, 2017.

ZHENG, Y.; LI, F.; HAO, L.; SHEDAYI, A. A.; GUO, L.; MA, C.; HUANG, B.; XU, M. The optimal CO₂ concentrations for the growth of three perennial grass species. **BMC Plant Biology**, v. 18, n. 1, p. 1–12, 2018.

ZILVERBERG, C. J.; HEIMERL, K.; SCHUMACHER, T. E.; MALO, D. D.; SCHUMACHER, J. A.; JOHNSON, W. C. Landscape dependent changes in soil properties due to long-term cultivation and subsequent conversion to native grass agriculture. **Catena**, v.160, p.282-297, 2018.

ZIMMERMANN, A.; SCHINN, D. S.; FRANCKE, T.; ELSENBEER, H.; ZIMMERMANN, B. Uncovering patterns of near-surface saturated hydraulic conductivity in an overland flow-controlled landscape. **Geoderma**, v.195-196, p.1-11, 2013.

PESSOA, Tiago de Carvalho. **Dinâmica da água e qualidade de pastagens no efluxo de CO₂ em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2019.

2. CAPÍTULO I: Caracterização hidrodinâmica de um Argissolo em encostas sob pastagem, utilizando o método Beerkan

2.1. RESUMO

As propriedades hidrodinâmicas do solo em encostas sob pastagem são afetadas pelos fatores: espaciais, temporais, sistema radicular, idade da pastagem, pisoteio animal, propriedades físicas do solo e posição na encosta, impactando na variabilidade do armazenamento de água ao longo da paisagem. Diante disso, objetivou-se usar o método Beerkan na obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos para determinação das curvas de retenção $\theta(h)$ e condutividade hidráulica $K(\theta)$ e da força de retenção predominante, em três posições de duas encostas em um Argissolo Vermelho Amarelo sob pastagem. A pesquisa foi realizada em encostas de topossequências na microbacia hidrográfica de Vaca Brava, Areia-PB; o armazenamento de água no solo foi avaliado utilizando a sonda de capacitância modelo *Diviner* 2000 e o ensaio de infiltração executado com anel simples, nas camadas de 0-10 e de 10-20 cm de profundidade. Já a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos foi através do modelo BEST no programa *Scilab* 5.3.3. Há variabilidade granulométrica entre as posições topográficas, sendo que na encosta sob pastagem com 22 anos (E22), existe mais argila do que na encosta sob pastagem com 2 anos (E2) de uso, e esse fator foi determinante em todas as características hidrodinâmicas do solo. O armazenamento de água e as curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ variaram em função das características granulométricas e hidrodinâmicas, que diferiram em profundidade, e em relação à posição na encosta e ao tempo de pastejo sobre a mesma. Na E22 predominaram poros que favorecem a força de retenção capilar (λ_c), enquanto na E2 predominaram poros que favorecem a ação das forças gravitacionais (λ_m). A capilaridade se relacionou com o maior armazenamento de água e as posições com maior teor de argila. E a gravidade com o menor armazenamento de água e os maiores teores de areia, pois a gravidade age na retirada de água da encosta, ao passo que a capilaridade age na retenção de água na encosta.

Palavras-chave: Granulometria; Topossequência; Umidade do solo;

PESSOA, Tiago de Carvalho. **Water dynamics and grassland quality in the efflux of CO₂ on hillslopes of Yellow Red Ultisol**. 2019. Thesis (Doctorate in Soil Science) - Post Graduate Program in Soil Science, Federal University of Paraiba, Areia, 2019.

Hydrodynamic characterization of an Ultisol in hillslope under pasture, using the method Beerkan

2.2. ABSTRACT

The hydrodynamic properties of the soil on hillslope under grassland are affected by: spatial, temporal, root system, grassland age, animal trampling, soil physical properties and hillslope position, impacting the variability of water storage along the landscape. Therefore, the objective was to use the Beerkan method to obtain the hydrodynamic parameters for the determination of the retention curves $\theta(h)$ and hydraulic conductivity $K(\theta)$ and the predominant retention force, in three positions of two hillslope in a Yellow Red Ultisols under pastures. The research was carried out in topossequence hillslope in the Vaca Brava watershed, Areia-PB; The soil water storage was evaluated using the *Diviner* 2000 capacitance probe and the single ring infiltration test, in the 0-10 and 10-20 cm depth layers. The determination of hydrodynamic parameters was through the BEST model in the *Sciliab* 5.3.3 program. There is granulometric variability between the topographic positions, and in the hillslope under grassland with 22 years (E22), exist more clay than in the hillslope under grassland with 2 years (E2) of use, and this factor was determinant in all the hydrodynamic characteristics of the soil. The water storage and the curves $\theta(h)$ and $K(\theta)$ varied depending on the granulometric and hydrodynamic characteristics, which differed in depth, and in relation to the position on the hillslope and the time of grazing on the same. In the E22, pores predominate that favor the capillary retention force (λ_c), while in the E2, pores predominate that favor the action of gravitational forces (λ_m). The capillarity was related to the higher water storage in the positions with higher clay content. And the gravity with the lowest water storage and the highest levels of sand, because gravity acts in the removal of water from the hillslope, while the capillarity acts in the water retention on the hillslope.

Keywords: Granulometry; Landscape; soil moisture;

2.3. INTRODUÇÃO

A caracterização hidrodinâmica do solo pode ser realizada utilizando-se métodos semifísicos como o “Beerkan”, que propõe a estimativa dos parâmetros das curvas de retenção $\theta(h)$ e da condutividade hidráulica $K(\theta)$ de forma rápida e de baixo custo, considerando a textura e a estrutura do solo (LASSABATÈRE et al., 2006; AIELLO et al., 2014; GHAVIDELFAR, SHAMSELDIN e MELVILLE, 2015; ALAGNA et al., 2016; BAGARELLO, DI PRIMA, IOVINO, 2017; DI PRIMA et al., 2017).

$\theta(h)$ e $K(\theta)$ podem ser descritas, analiticamente, por dois parâmetros de forma (m ou n e η), relacionados principalmente com a textura, e três parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g) dependentes da estrutura do solo. Os parâmetros de forma são obtidos a partir da curva de distribuição dos tamanhos das partículas $F(D)$ e da porosidade (α), enquanto os parâmetros de normalização são determinados a partir de experimentos de infiltração (SOUZA et al., 2008; CASTELLINI, DI PRIMA, IOVINO, 2018).

Experimentos de infiltração foram realizados por Ma et al. (2017) para testar o método Beerkan, os valores simulados pelo método Beerkan, indicaram que a estimativa da condutividade hidráulica saturada foi similar aos valores medidos pelo método direto. Os mesmos autores observaram que as curvas de retenção, estimadas pelo método Beerkan, também se assemelharam com aquelas medidas pelo método direto.

As propriedades hidrodinâmicas dos solos sob pastagens são afetadas por diversos fatores, sobretudo associados a aspectos espaciais e temporais, relacionados às características dos sistemas radiculares e das taxas de pisoteio do gado (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2014). Que são intensificadas em pastagens cultivadas em paisagens de relevo ondulado, com variação de inclinação e da textura do solo (SANTOS e SALCEDO, 2010, SANTOS et al., 2016).

Tudo isso impacta na variabilidade do armazenamento de água ao longo da paisagem (DYMOND et al., 2017), sendo mais intensificada em função dos efeitos da inclinação do relevo, dessa forma a umidade do solo pode variar entre as posições da encosta (LEE e KIM, 2019), refletindo um maior efeito gravitacional ou capilar (SOUZA et al., 2014; HAWTHORNE e MINIAT, 2018; XIAO et al., 2019), a depender das cotas topográficas e da textura do solo, respectivamente; além das suas características hidrodinâmicas.

Esses padrões espaciais de variação na umidade e da condutividade hidráulica, refletem amplamente as propriedades hidráulicas do solo e os efeitos combinados da textura (SILVA et al., 2018), vegetação, posições topográficas e a ação antrópica (MEI et

al., 2018; BEVINGTON et al., 2016). E resultam na variabilidade da água armazenada ao longo da paisagem do relevo, onde, em alguns casos há maior conteúdo de água armazenada nas cotas mais altas do que nas mais baixas do relevo.

Assim, hipotetizamos que a granulometria do solo tem mais influência nas características hidrodinâmicas e no armazenamento de água, do que a localização da posição topográfica no relevo. Neste contexto, utilizou-se o modelo Beerkan para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos, com o objetivo de determinar as curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ e a força de retenção predominante, em três posições de duas encostas em um Argissolo Vermelho Amarelo sob pastagem.

2.4. MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1. Área de estudo

A pesquisa foi realizada na microbacia hidrográfica de Vaca Brava, Paraíba (06°57'48" e 06°59'43" de latitude S e 35°44'03" e 35°45'59" de longitude O) que possui predominantemente dois tipos de uso do solo, uma área de reserva ecológica e outra de agropecuária familiar (794 ha), que juntas ocupam uma superfície de 1.500 ha distribuídas entre os municípios de Areia/PB e Remígio/PB. Na área usada pela agricultura familiar, a pastagem é o tipo de uso com maior abrangência, em função da pecuária ser a principal atividade econômica desta região (GALVÃO, SALCEDO e SANTOS, 2005), onde a criação de animais é extensiva.

A maior parte da microbacia está localizada no município de Areia/PB, na qual segundo Alvares et al. (2013), predomina o clima do tipo As', que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono e inverno, com estação seca podendo atingir entre 5 e 6 meses; com pluviometria que varia entre 900 e 1.400 mm, concentradas nos meses de abril a julho e com período seco entre setembro e fevereiro. A temperatura média anual é de 24°C.

A microbacia possui uma altitude média de 637 m, com o relevo apresentando variações entre ondulado a fortemente ondulado, e em algumas áreas, relevo menos declivoso. A área da microbacia onde foi realizado o experimento apresenta características edafoclimáticas de transição.

2.4.2. Classificação e divisão das encostas

As distintas formas da encosta possuem a mesma classe de solo (Argissolo Vermelho Amarelo), gênero e espécie de gramínea formadora do pasto, presença de

pastejo por bovinos, mas distintas idades e áreas de cultivo. As encostas foram divididas conforme suas características e idade de pastejo em encosta de 2 e de 22 anos de uso.

A encosta 2 (E2), com pastagem recuperada, (localizada a 6°58'02,4" de latitude S e 35°46'11,7" de longitude O) apresenta forma convexa e está inserida em uma área de 8 ha. Que esteve sob pastagem por 20 anos, inicialmente pastagem de *Urochloa decumbens*, mas devido à predominância da espécie invasora capim Lucas (*Sporobolus indicus* L.), foi efetuada três gradagens na área, para morte da vegetação e desfragmentação do solo, com posterior calagem (aplicação de 1.300 kg ha⁻¹ de calcário calcítico) a lanço em área total, para elevação da saturação por bases a 70%, e a semeadura mecânica das sementes de *Urochloa decumbens*, cultivar Basilisk. Atualmente essa pastagem está no seu segundo ano de uso, após o replantio.

A encosta 22 (E22), com pastagem estabilizada, (localizada a 6°57'55,9" de latitude S e 35°46'14,4" de longitude O), apresenta forma convexa inserida numa área de 13 ha, foi constituída de pastagem de *Urochloa decumbens* estabelecida há cerca de 22 anos, após escarificação para descompactação do solo, seguida de uma aração para desfragmentação da estrutura, não havendo semeadura de novas sementes, o estabelecimento da pastagem foi oriundo da germinação das sementes presentes no pasto incorporado ao solo.

As variadas formas das topossequências resultam em diferentes declividades ao longo da paisagem do relevo, portanto Santos, Salcedo e Candeias (2002) dividiram as topossequências nas seguintes posições: topo, ombro, meia encosta, pedimento e várzea, sendo a encosta composta pelas posições do ombro, meia encosta e pedimento (Figura 1). Na tabela 1, estão as informações resumidas da pastagem e do relevo das encostas.

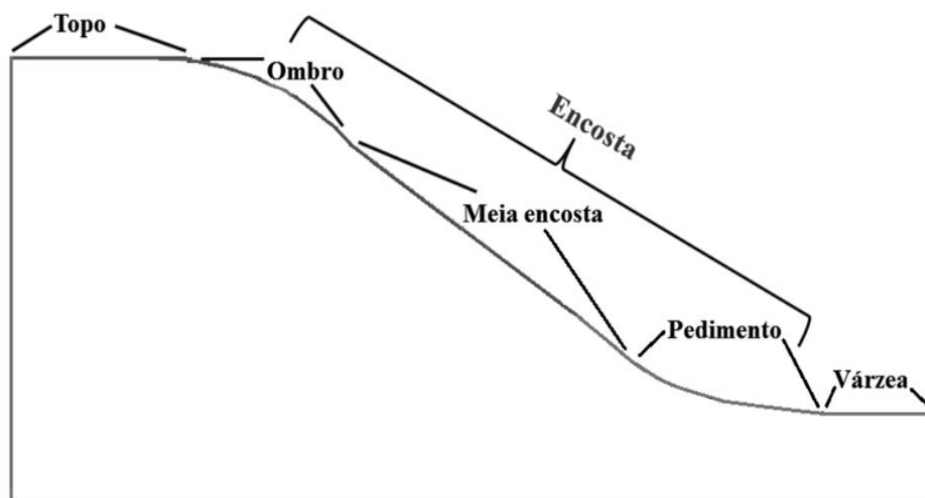


Figura 1. Posições do relevo na topossequência por Santos, Salcedo e Candeias (2002).

Tabela 1. Características da pastagem e do relevo na encosta 2 (E2) e encosta 22 (E22).

Características		E22	E2
Tempo de implantação da pastagem		22 anos	2 anos
Área de pastejo (ha)		13	8
¹ Lotação animal (UA ha ⁻¹)		2,21	3,59
Forma de exploração		Baixa tecnologia	Baixa tecnologia
Manutenção		Arranquio de invasoras	Arranquio de invasoras
Forma de exploração		Consumo total do pasto	Consumo total do pasto
Pousio		Para rebrota do pasto	Para rebrota do pasto
Forma da encosta		Convexa	Convexa
Comprimento de rampa		60 m	52 m
Ombro		16	18
² Declividade das posições (%)	Meia encosta	21	19
	Pedimento	16	16

¹UA= Unidade animal; ²Ombro e Meia encosta= 16 m de comprimento de rampa, ambos; Pedimento= 12 m de comprimento de rampa.

2.4.3. Quantificação da pluviosidade e do armazenamento de água nas encostas

Os dados de precipitação pluvial foram monitorados em uma estação meteorológica automatizada. Instalada na área de estudo.

O armazenamento de água no solo foi monitorado em cada posição do relevo das encostas, com uma sonda de capacitância (modelo Diviner 2000). Que ao ser inserido no tubo de acesso no solo, provê automaticamente leituras da frequência da água a cada 10 cm de profundidade, à medida que é inserida (SENTEK, 2009). Esta determinação usa a técnica da capacitância ou reflectometria no domínio da frequência (FDR), que tem como base a constante dielétrica do solo ou capacitância da matriz do solo (ar, água, solo), a qual é relacionada com a umidade volumétrica (θ_v).

Para isso, três tubos de acesso foram instalados (no sentido do declive) nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, a uma distância de 8 m nas posições do ombro e meia encosta, e 6 m na posição do pedimento, a 20 cm de profundidade em cada posição das encostas. Essa menor distância entre os tubos do pedimento se fez necessário para que se respeitasse o limite da posição, visto que ela tem um comprimento menor que as demais posições. O solo retirado durante a instalação dos tubos foi utilizado para os acomodar, após a instalação dos mesmos.

As curvas de calibração da umidade do solo foram geradas utilizando o modelo: $\theta_v = aFR^b$, em que, θ_v = umidade volumétrica (cm³ cm⁻³); FR = frequência relativa

(adimensional); a e b são coeficientes gerados pela regressão (modelo potência) (SENTEK, 2009). As curvas de calibração utilizadas nesse trabalho, foram determinadas por Rebequi (2015) para a encosta 22 (Tabela 2), cujo pedimento possui textura similar a todas as posições da encosta 2, portanto, foi utilizado a curva de calibração do pedimento da encosta 22, em todas as posições da encosta 2.

A utilização da curva de calibração de um local para estimar a umidade do solo em outro local com características granulométricas semelhantes é confiável, uma vez que existe uma forte correlação entre condições semelhantes de texturas de solo (ANDRADE-JUNIOR et al., 2007).

Tabela 2. Curvas de calibração da umidade volumétrica de um Argissolo Vermelho Amarelo sob pastagem, em duas profundidades na encosta 2 (E2) e na encosta 22 (E22) nas posições do ombro, meia encosta e pedimento.

Posição na encosta	Profundidade (cm)	E22	E2
Ombro	0-10	$Y = 0,3188X^{2,3882} R^2 (0,76)$	$Y = 0,2920X^{2,5745} R^2 (0,83)$
	10-20	$Y = 0,3809X^{1,7176} R^2 (0,92)$	$Y = 0,3218X^{2,5142} R^2 (0,90)$
Meia encosta	0-10	$Y = 0,4219X^{2,7261} R^2 (0,87)$	$Y = 0,2920X^{2,5745} R^2 (0,83)$
	10-20	$Y = 0,5119X^{2,5445} R^2 (0,96)$	$Y = 0,3218X^{2,5142} R^2 (0,90)$
Pedimento	0-10	$Y = 0,2920X^{2,5745} R^2 (0,83)$	$Y = 0,2920X^{2,5745} R^2 (0,83)$
	10-20	$Y = 0,3218X^{2,5142} R^2 (0,90)$	$Y = 0,3218X^{2,5142} R^2 (0,90)$

*Curvas de calibração usadas para estimar a umidade volumétrica nas camadas de 0-10 e de 10-20 cm de profundidade do solo (REBEQUI, 2015).

2.4.4. Modelo BEST- Algoritmo de análise de dados

O método Beerkan baseia-se nas propriedades estáticas e dinâmicas do solo, como a curva granulométrica e a curva de infiltração da água no solo, respectivamente, para se obter os parâmetros das curvas de condutividade e de retenção de água no solo.

Por isso, utilizou-se o modelo BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments) para determinação dos parâmetros de forma (**m** ou **n**- parâmetros de forma da curva de retenção e **η**- parâmetro de forma da curva de condutividade) e os de normalização (**θ_s**- umidade volumétrica saturada, **K_s**- condutividade hidráulica do solo saturado e **h_g**- potencial de entrada de ar na matriz porosa do solo) (LASSABATÉRE et al., 2006; SOUZA et al., 2008; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2014). O modelo BEST foi executado através do software *Scilab* versão 5.3.3.

2.4.4.1. Ensaio de infiltração e análise física do solo

Os ensaios de infiltração foram realizados próximos aos tubos de acesso de acompanhamento da umidade do solo, nas duas profundidades (0-10 cm e 10-20 cm). Utilizou-se nos ensaios um infiltrômetro de anel simples com 150 mm de diâmetro. O ensaio consistiu na anotação do tempo que volumes constantes de água (30-100 ml) adicionados continuamente no anel, levaram para infiltrar; encerrando o ensaio quando o fluxo atingiu o regime permanente, ou seja, o fluxo constante com o tempo. A curva de infiltração acumulada, tridimensional (I_3), foi determinada em função do tempo (t), $I_3(t)$.

Durante os ensaios de infiltração foram coletadas amostras indeformadas, com anel volumétrico, visando à determinação da densidade do solo (ρ_s) e amostras deformadas para determinação dos conteúdos volumétricos de água inicial (θ_0), final (θ_s) e para obtenção da curva granulométrica. A análise granulométrica foi realizada utilizando-se o método da ABNT (1984), o qual permite determinar os diâmetros das partículas mais finas (argila e Silte) por sedimentação e as mais grosseiras (areia) por peneiramento.

2.4.4.2. Curva granulométrica

A curva de distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ é determinada assumindo-se a semelhança entre ela e a curva de retenção de água no solo $\theta(h)$, Haverkamp e Parlange (1986) apresentaram a seguinte equação para expressar $F(D)$:

$$F(D) = 1 + \left[\left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad \text{com } M = 1 - \frac{2}{N} \quad (1)$$

D é o diâmetro da partícula (mm), D_g o parâmetro de escala do tamanho das partículas (mm) e M e N os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

2.4.4.3. Metodologia Beerkan

Nesta metodologia são determinados os parâmetros da curva de retenção da água no solo $[\theta(h)]$ descrita pelo modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} + \theta_r \quad (2)$$

$$m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{Burdine, 1953}) \quad (3)$$

E os parâmetros da curva de condutividade hidráulica do solo $[K(\theta)]$ descrita pelo modelo de Brooks e Corey (1964):

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (4)$$

$$\eta = \frac{2}{\lambda} + 2 + p \quad \lambda = mn \quad (5)$$

$p = 1$ (Burdine, 1953)

Sendo θ o conteúdo volumétrico de água [$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$], θ_s o conteúdo volumétrico de água do solo saturado [$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$]; θ_r o conteúdo volumétrico de água residual [$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$]; h [cm] potencial matricial ($h = \Psi_m$); h_g [cm] um valor de escala de h ; m , n e η parâmetros de forma; K_s a condutividade do solo saturado [mm.s^{-1}].

2.4.4.4. Escalas características

A escala de comprimento capilar, λ_c , (Eq. 6) representa a importância relativa das forças capilares em relação à gravidade, quando a água é transmitida de uma fonte através do solo, com umidade inicial θ_0 . O raio característico de poros (Eq. 7) define a dimensão média dos poros que participam do processo de infiltração submetida à pressão aplicada h ; quanto maior for o raio característico, λ_m , maior é o efeito da gravidade em comparação ao da capilaridade (SOUZA et al., 2014). Daí deduziu-se qual a força potencial que mais influi na retenção de água nas encostas.

$$\lambda_c = \frac{\delta S^2}{(\theta_s - \theta_0)K_s} \quad (6)$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_a g \lambda_c} \quad (7)$$

λ_c é a escala de comprimento capilar (mm); λ_m é o raio característico de poros hidraulicamente ativos (mm); σ a tensão superficial da água ($0,0719 \text{ N m}^{-1}$); ρ_a a massa específica da água (10^3 kg m^{-3}), g a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$) e δ um parâmetro de forma da difusividade ($1/2 \leq \delta \leq \pi/4$), que foi considerado igual a 0,55 (WHITE e SULLY, 1987).

2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físicas do solo (Tabela 3) nas posições: ombro, meia encosta e pedimento, resultaram em variação na classe textural, entre as profundidades de 0-10 e 10-20 cm, nas três posições da encosta 22 (E22), mas não nas três posições da encosta 2 (E2).

A profundidade e a localização da posição na encosta resultaram em maior teor de argila no ombro e meia encosta, e maior teor de areia no pedimento (Tabela 1). Esse maior teor de areia é resultante do processo de erosão hídrica no ombro e meia encosta, que retira

areia dessas posições e deposita no pedimento, por isso, os maiores teores de areia são quantificados, nas duas profundidades, nessa posição.

Tabela 3. Caracterização física do Argissolo Vermelho Amarelo em duas profundidades nas posições do ombro, meia encosta e pedimento na encosta 2 (E2) e encosta 22 (E22) sob pastagens

Posição	Prof (cm)	¹ AT		Silte		Argila		² Ds		³ Dp		⁴ Pt		⁵ CTex	
		E22	E2	E22	E2	E22	E2	E22	E2	E22	E2	E22	E2	E22	E2
		----- % -----						----- g cm ⁻³ -----				cm ³ cm ⁻³			
Ombro	0-10	65	73	19	18	16	9,0	1,60	1,69	2,56	2,67	0,40	0,36	FA	FA
	10-20	62	67	17	20	21	13	1,65	1,69	2,57	2,70	0,38	0,36	FAA	FA
M.encosta	0-10	69	75	17	16	14	9,0	1,71	1,66	2,58	2,63	0,35	0,37	FA	FA
	10-20	63	71	16	19	21	10	1,70	1,72	2,61	2,60	0,36	0,35	FAA	FA
Pedimento	0-10	78	77	15	17	7,0	6,0	1,58	1,63	2,57	2,64	0,40	0,39	AF	AF
	10-20	70	79	18	15	12	6,0	1,71	1,67	2,58	2,64	0,35	0,37	FA	AF

¹Areia total; ²Densidade do solo; ³Densidade de partículas; ⁴Porosidade total; ⁵Classe textural: FA- Franco arenoso; FAA- Franco argiloarenoso; AF- Areia Franca;

As propriedades físicas na E22 estão, atualmente, em uma condição de maior estabilidade, porém ao longo do tempo suas posições sofreram os efeitos da erosão e pisoteio animal, que se refletiu na diferenciação textural entre as camadas de 0-10 e de 10-20 cm (Tabela 3). A E2 por estar em uso há apenas dois anos, após o revolvimento do solo, apresenta uma homogeneidade textural entre as camadas de solo até a profundidade do revolvimento (20 cm), isso resultou na mesma classificação granulométrica entre as camadas de 0-10 e de 10-20 cm.

A densidade do solo em ambas as encostas é elevada (acima de 1,5 g cm⁻³), no entanto, na camada de 0-10 cm as densidades são inferiores as de 10-20 cm e por consequência, em geral, a porosidade foi maior na camada de 0-10 cm. A alta densidade do solo na E22 é resultante dos sucessivos anos com sobrepastoreio pela alta carga animal na área (2,21 UA ha⁻¹) (Tabela 1). Mesmo o solo da E2 tendo sido revolvida, recentemente, a densidade do solo já se encontra elevada, por essa encosta ser arenosa, a sua massa específica será maior, no entanto, em pouco tempo, com uma carga animal na ordem de 3,59 UA ha⁻¹ isto levará o solo a degradação.

Os valores absolutos da densidade do solo na E2 estão em média no mesmo valor que na E22 (Tabela 3). Isso pode, futuramente, limitar o crescimento radicular e a produção de pasto para alimentação do rebanho, porque o pisoteio animal que altera significativamente a densidade do solo, afeta negativamente a produção da pastagem (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2014).

O armazenamento de água no solo (Figura 2) refletiu as propriedades físicas de cada encosta, indicando que nessas condições a umidade está relacionada principalmente

ao teor de argila, e onde há maior teor de argila predomina poros com menor raio capilar e consequentemente com maior capacidade de retenção de água por adsorção (REICHARDT e TIMM, 2012), fator que garantiu o maior armazenamento de água nas posições do ombro e meia encosta, em relação ao pedimento na E22, caso contrário o potencial gravitacional impediria esse efeito, como pode ser verificado na E2.

Na E2 os altos teores de areia e baixos teores de argila em todas as posições e profundidades, resultaram em curvas muito próximas, com pouca ou nenhuma diferença de armazenamento entre posições e profundidades, o que indica pouco ou nenhum efeito da declividade no armazenamento de água nessas condições e forte efeito da textura, principalmente do teor de argila.

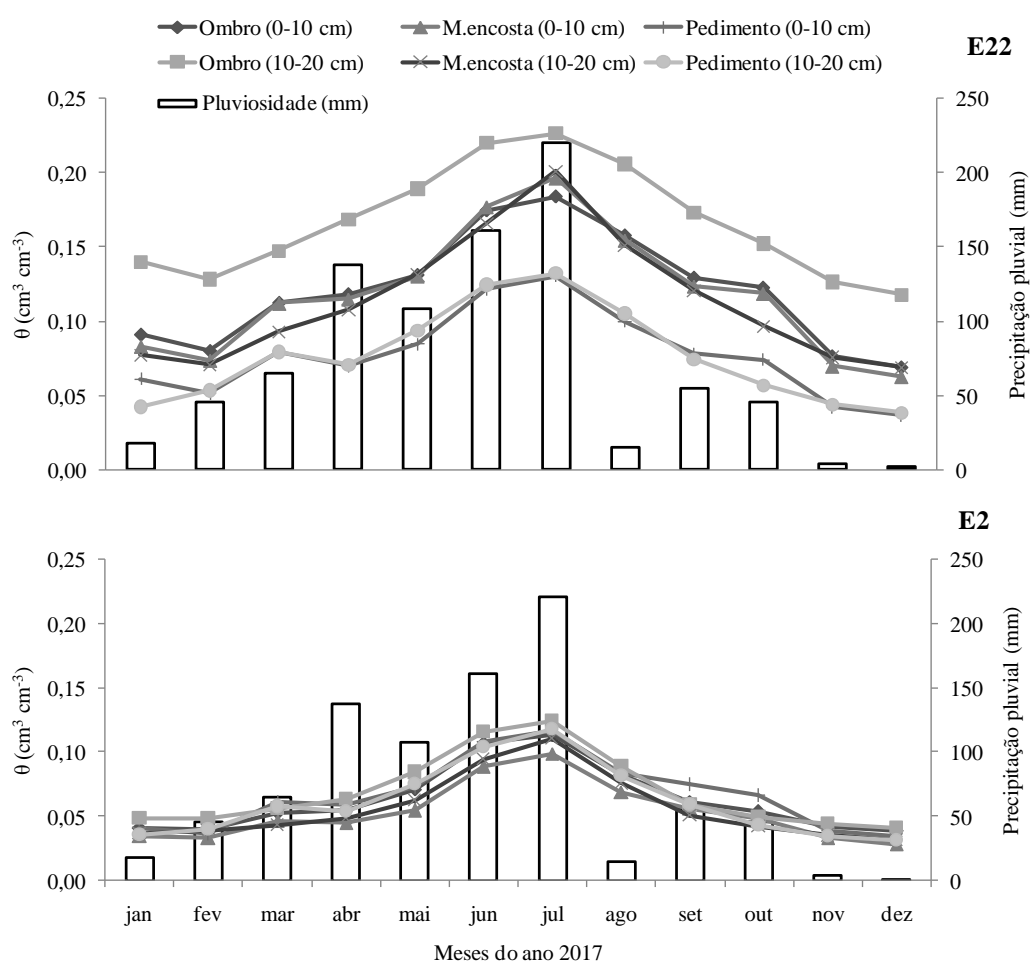


Figura 2. Armazenamento médio mensal de água pluvial aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade em um Argissolo Vermelho Amarelo nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 2 (E2) e encosta 22 (E22) sob pastagens

O maior armazenamento de água na E22, encosta mais argilosa, foi na ordem de $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o menor de $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto na E2, encosta mais arenosa, o maior foi da ordem de $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o menor de $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A maior retenção de água na E22, em relação a E2 está fortemente ligada à aspectos texturais, pois na E2, devido ao teor

de areia, predominam às forças gravitacionais que favorecem a retirada da água da encosta, enquanto na E22, devido ao teor de argila, predominam às forças capilares que influenciam na adsorção de água à superfície dos colóides.

As curvas granulométricas $[F(D)]$ para cada posição da E22 e E2 (Figura 3) demonstraram que em ambas as encostas predominam partículas de tamanho maiores que 0,1 mm, embora na E22 haja maior quantidade de partículas menores que 0,1 mm que na E2, baseado na classificação textural (Tabela 3). A meia encosta E22 (Figura 3) apresentou uma proporção de 30% de partículas menores que 0,1 mm (Silte e Argila).

A proporção de partículas menores que 0,1 mm da E22 foi superior a E2, o que indica maiores quantidades de silte e argila na E22. Além disso, pela separação das linhas há uma distinção clara entre profundidades e posições na E22, com exceção da meia encosta (0-10 e 10-20 cm) que apresenta linhas sobrepostas, ou seja, com mesma proporção granulométrica. Já na E2 há uma maior similaridade granulométrica entre posições e camadas do solo, com proximidade entre as linhas.

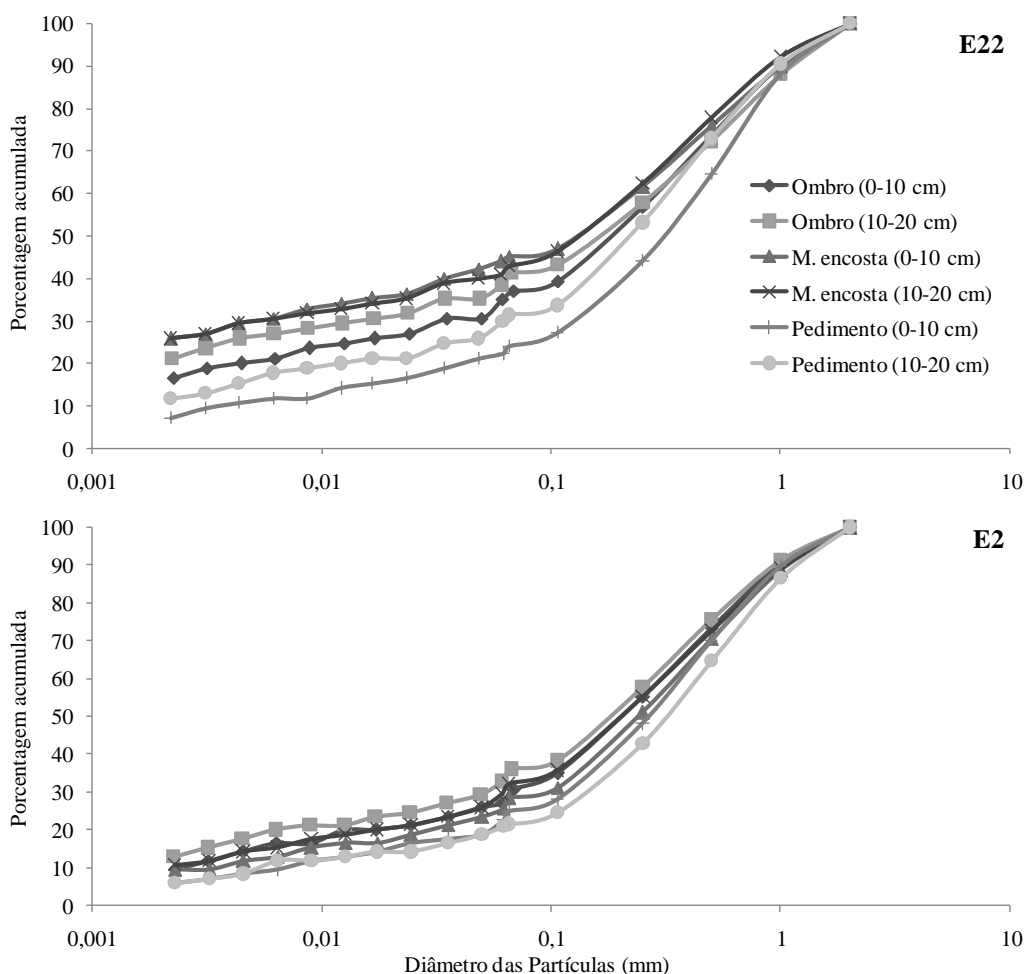


Figura 3. Curvas granulométricas aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade em um Argissolo Vermelho Amarelo nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 2 (E2) e encosta 22 (E22) sob pastagens

Os testes de infiltração (Figura 4) refletiram a textura e a estrutura das camadas avaliadas na encosta. Assim, as lâminas de água infiltraram em volumes e tempos distintos em função da profundidade e da posição topográfica. Os menores tempos de infiltrações (Figura 4) e os maiores volumes de água infiltrados foram observados na posição do pedimento (0-10 cm) na E22. Enquanto, os maiores tempos de infiltração e menores volumes de água infiltrados foram observados no ombro (10-20 cm) da E2 e na meia encosta (10-20 cm) da E22.

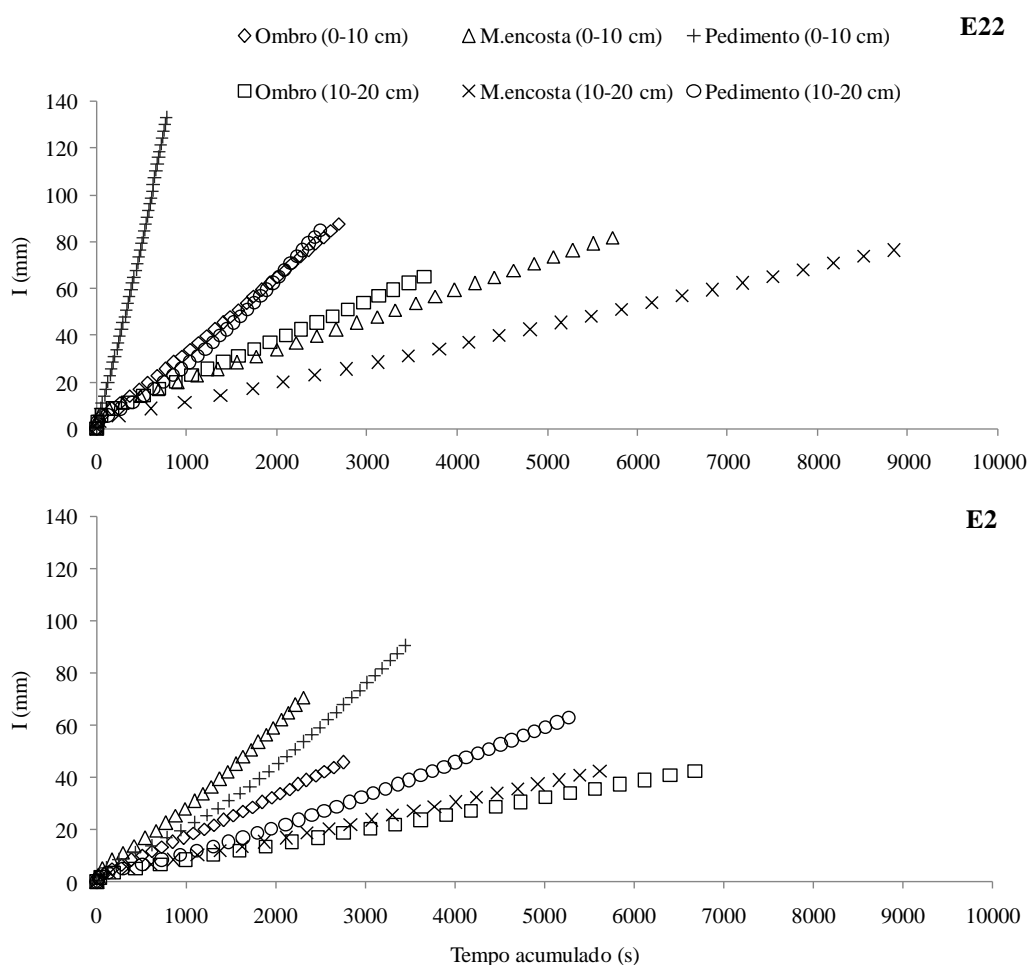


Figura 4. Curvas de infiltração acumulada [I (mm)] em função do tempo para os 0-10 e 10-20 cm de profundidade, no Argissolo Vermelho Amarelo nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 2 (E2) e encosta 22 (E22) sob pastagens

A infiltração (Figura 4) foi menor, na E2 que na E22, nas posições do ombro e pedimento, porém foi maior na E2 na posição da meia encosta. A curvatura e a distância entre as linhas de infiltração se assemelharam aos resultados obtidos por Xiao et al. (2019) para solo arenoso com densidade de $1,72 \text{ g cm}^{-3}$, os tempos de infiltração, em alguns casos, também se assemelham aos dos autores citados; que encontraram tempo de infiltração superior a 2700 s para a densidade do solo de $1,72 \text{ g cm}^{-3}$.

Os valores de infiltração na E22 estão fortemente ligados à textura e a densidade do solo (Tabela 3), pois a maior taxa de infiltração (Figura 4) ocorreu no pedimento (mais arenoso) e a menor na meia encosta (mais compactado). Já a infiltração na E2 foi maior na meia encosta (0-10 cm) e menor no ombro (10-20 cm), embora a E2 seja uma encosta de solo arenoso a infiltração foi muito lenta, o que está ligado às altas densidades do solo em todas as camadas e posições. O que indica o fator compactação, é que a porosidade total (Tabela 3) da E2 nas duas profundidades é idêntica a da E22. Isto está impactando a taxa de infiltração na E2, criando um impedimento ao deslocamento vertical da água.

O parâmetro de forma “n” (Tabela 4), que depende da textura e são menores em solos argilosos, foi maior nas camadas e posições com maior teor de areia, e os valores na E2 foram maiores que na E22. Estes valores, em alguns casos, são menores que os encontrados por Lassabatère et al. (2006) que observaram variações de 2,20 a 2,97; no entanto, estão de acordo com Souza et al. (2008) que para as mesmas classes texturais, que são encontradas nessas encostas, obtiveram valores para n de 2,12 (franco argilo arenoso) 2,13 e 2,16 (Franco arenoso) e 2,31 (Areia franca).

Tabela 4. Parâmetros da caracterização hidrodinâmica de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 2 (E2) e encosta 22 (E22) sob pastagens

		n^1		θ_0^2		θ_s^3		S^4		K_s^5		hg^6		λ_c^7		λ_m^8	
Posição	Prof cm	E22	E2	E22	E2	E22	E2	E22	E2	E22	E2	E22	E2	E22	E2	E22	E2
Ombro	0-10	2,16	2,22	0,09	0,05	0,35	0,33	0,43	0,40	0,03	0,03	-188	-190	39	20,7	0,27	1,03
	10-20	2,14	2,19	0,16	0,10	0,32	0,31	0,25	0,15	0,01	0,005	-205	-111	28	14,3	0,27	0,69
Meia encosta	0-10	2,17	2,22	0,07	0,04	0,36	0,35	0,44	0,47	0,01	0,03	-349	-112	35	14,0	0,21	0,74
	10-20	2,14	2,19	0,12	0,08	0,31	0,31	0,16	0,19	0,01	0,01	-121	-124	33	15,8	0,28	0,78
Pedimento	0-10	2,20	2,24	0,06	0,04	0,34	0,35	0,82	0,25	0,22	0,03	-87,0	-33,0	14	4,8	0,77	1,54
	10-20	2,21	2,21	0,07	0,05	0,31	0,34	0,20	0,14	0,02	0,01	-67,0	-32,0	10	4,0	1,21	1,88

¹um parâmetro de forma; ²umidade inicial do solo; ³umidade do solo saturado; ⁴sorvidade; ⁵condutividade hidráulica do solo saturado; ⁶Potencial de entrada de ar na matriz porosa do solo; ⁷escala de comprimento capilar; ⁸raio característico de poros hidraulicamente ativos;

Na tabela 4, apresentam-se os parâmetros de normalização (θ_s , K_s e hg) além de θ_0 , S , λ_c e λ_m para as duas profundidades e as três posições das duas encostas (E22 e E2). Essas propriedades foram bem distintas para as posições nas duas encostas, variando em função da profundidade e da classe textural. Os valores de S e K_s aumentaram em função do teor de areia e em função da profundidade, sendo que nas três posições da E22, na camada de 0-10 cm, houve variação em S e K_s .

Entretanto, nas três posições da E2, na camada de 0-10 cm, só houve variação em S e não em K_s ; Esses dois parâmetros indicam a infiltrabilidade do solo, o que nos leva a inferir que no ombro e pedimento, nas duas camadas de solo, a E22 é mais permeável que

a E2; porém, na meia encosta E2, o valor de S é maior nas duas profundidades e o de Ks maior em 0-10 cm e igual de 10-20 cm em relação à E22.

Também na tabela 4, o λ_m (raio característico de poros hidraulicamente funcionais) e λ_c (escala de comprimento capilar) são fortemente dependentes, inclusive no formalismo matemático. Daí serem inversamente proporcionais, à medida que λ_m está relacionado com forças gravitacionais e λ_c com forças capilares.

Portanto, observamos que os valores de λ_c foram maiores em todas as posições da E22 em comparação a E2, e que na E22, ombro e meia encosta, nas duas profundidades, apresentaram maiores valores de λ_c que no pedimento, por haver maior teor de argila no ombro e meia encosta, a capilaridade é maior nessas duas posições em relação ao pedimento que possui menor teor de argila. Por isso, no ombro e meia encosta E22, predomina a capilaridade em relação às forças gravitacionais. Logo, explicam-se as maiores retenções de água da Figura 2 terem sido no ombro e meia encosta da E22.

Os valores dos raios de poros que efetivamente transportam água, λ_m , foram maiores em todas as posições na E2 que na E22, e no pedimento da E22 em relação ao ombro e meia encosta. Indicando que nas três posições da E2 e no pedimento da E22, predominam forças gravitacionais em relação à capilaridade. Esses poros maiores na E2 foram causados pelo revolvimento do solo, porque solos revolvidos por aração não apresentam resistência a infiltração, então apresentam muitos poros hidraulicamente ativos (λ_m) (ROULIER, et al., 2002), ao ponto que a infiltração correlaciona-se negativamente com a resistência mecânica do solo (SOUZA et al., 2014)

Os valores do raio característico de poros hidraulicamente funcionais (λ_m) foram bastante elevados e variaram de 0,21 a 1,88 mm, sendo contrastantes aos valores encontrados por Souza et al. (2008) (0,05 a 0,38 mm), Souza et al. (2014) (0,01 a 0,47 mm) ambos com granulometria idênticas as desse trabalho; e semelhante aos maiores valores observados por Xiao et al (2019) (0,62 a 1,85) com granulometria distintas as desse trabalho.

O potencial de entrada de ar (hg) na matriz porosa do solo, hg, teve uma ampla variação de valores (-32 a -349 mm); Ghavidelfar, Shamseldin e Melville (2015), também observaram uma grande variação nos valores de hg, que é função da saturação de poros por água e por isso varia com as características texturais.

A curva de retenção expressa em coluna de água ($h = cm$) (Figura 5), e de condutividade (Figura 6) da água no solo foram geradas através dos parâmetros de forma (n, além de η) e os de normalização (θ_s , Ks e hg), descritos na tabela 4, com exceção de η , que embora não estando descrito, foi calculado.

As curvas de retenção $[\theta(h)]$ da E22 apresentadas na Figura 5 indicam variação no teor de umidade entre as profundidades e posições, com mais água retida em $h = 15.000$ cm (Ponto de murcha permanente), no ombro ($0,14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) à profundidade de 10-20 cm e meia encosta ($0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) à profundidade de 0-10 cm. Em tensões menores ($h = 10$ cm) (próximo a saturação do solo) os maiores conteúdos de água foram no ombro ($0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e meia encosta ($0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), ambas na profundidade de 0-10 cm. Os menores valores de umidade foram nas duas profundidades do pedimento sob tensão de 15.000 cm.

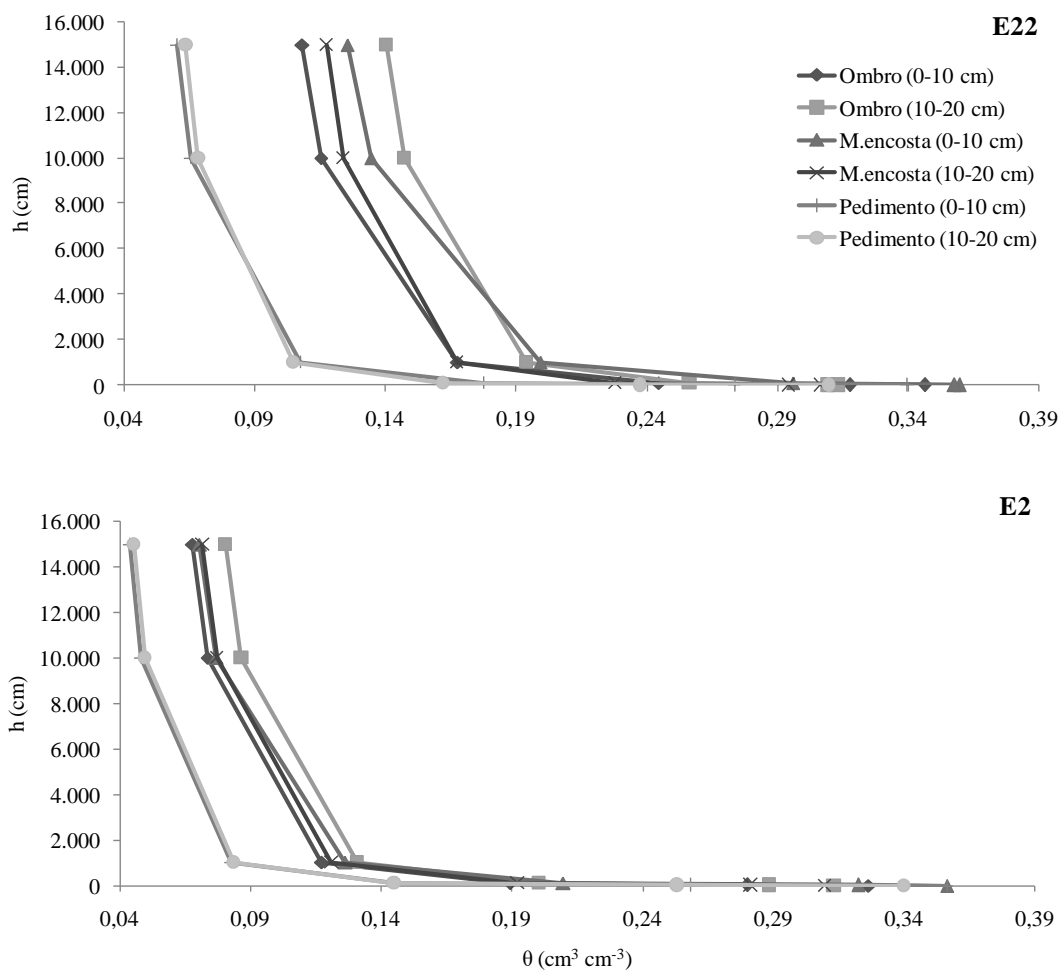


Figura 5. Curvas de retenção de água em um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento na encosta 2 (E2) e encosta 22 (E22) sob pastagens

As curvas de retenção em E2 (Figura 5) tiveram a mesma tendência que em E22, entretanto, de modo geral a E2 armazena menos água que a E22. Além disso, entre as posições da E2 há semelhanças no armazenamento de água, com curvas bem mais próximas, reflexo das características físicas e hidrodinâmicas semelhantes. Ainda assim é possível notar que o ombro E2 na profundidade de 10-20 cm é onde há a maior umidade ($0,08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) na tensão $h = 15.000$ cm. Semelhante à E22 a menor umidade na E2 foi no pedimento, nas duas profundidades, para h a partir de 100 cm (capacidade de campo).

Em baixas tensões ($h=10$ cm) a maior umidade na E2, foi na meia encosta ($0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) a profundidade de 10-20 cm. Em tensões menores que $h=10$ cm, a maior umidade foi na meia encosta ($0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e no pedimento ($0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para tensão $h=0$, na profundidade de 10-20 cm em E2.

As maiores retenções de água no ombro e meia encosta na E22 e E2, estão relacionadas com a capilaridade e adsorção das moléculas de água. Já vimos que nessas encostas, o ombro e a meia encosta têm mais poros de comprimento capilar (λ_c) que o pedimento. Portanto, nessas duas posições, o potencial matricial está sendo mais influente que o potencial gravitacional, o que explica as maiores retenções de água no ombro e meia encosta, mesmo com a elevada declividade, então contra as forças gravitacionais, caso contrário a água seria retirada das posições superiores.

Quando a umidade tende a saturação dos poros (menores tensões) o efeito gravitacional ganha destaque como pode ser verificado na Figura 5, no entanto, a medida que o solo perde água o componente matricial (resultante de forças capilares e de adsorção) passa a ser mais importante que o gravitacional (REICHARDT e TIMM, 2012).

Em todas as posições da E2 em relação a E22, os efeitos gravitacionais (λ_m) sobrepõem os capilares (λ_c). Porém, no ombro e meia encosta da E22 há mais poros com raio capilar (λ_c) que no pedimento da mesma, e isso é suficiente pra nas maiores tensões, a retenção ser maior nessas duas posições que no pedimento.

O que indica que a argila é a mais importante fração granulométrica na retenção de água nessas encostas, pois nas posições com maior teor de argila houve maior retenção de água, uma vez que a argila está associada com a capilaridade do solo, nessas encostas. Lee e Kim (2019) apresentaram resultados semelhantes, quando a tensão aplicada foi a mesma, a umidade foi maior no solo com teor de argila de 24,25% em relação ao solo com 17,96% de argila; demonstrando que uma pequena variação no teor de argila é suficiente para se ter efeitos significativos da capilaridade do solo na retenção de água.

As curvas de condutividade hidráulica (Figura 6) representam o comportamento hídrico nas duas profundidades e três posições da encosta. Como era de se esperar, na E22, e pelos valores de S e K_s a maior condutividade hídrica foi na posição do pedimento nas duas profundidades, logicamente quando o solo tendeu a saturação a condutividade foi maior, em todas as condições.

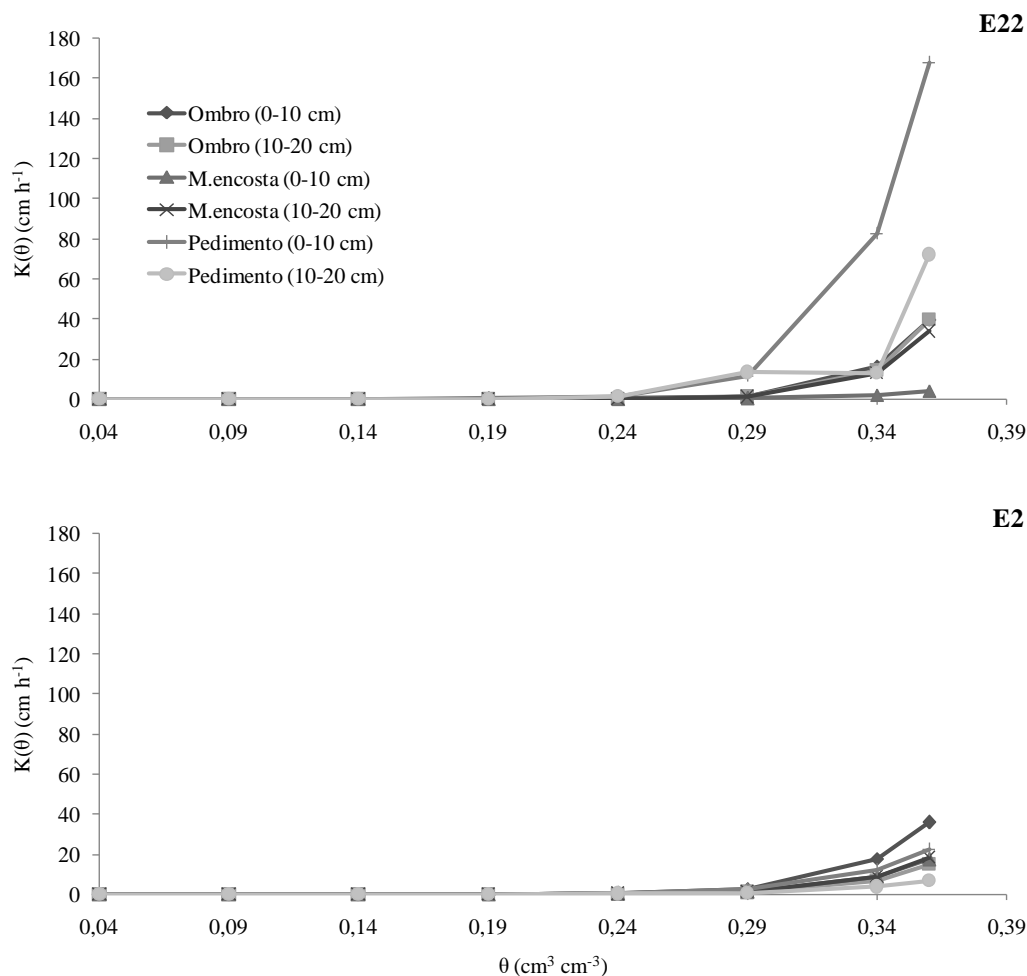


Figura 6. Curvas de condutividade hidráulica de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-10 e 10-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento da encosta 2 (E2) e encosta 22 (E22) sob pastagens

Considerou-se a umidade de saturação aquela retida no menor potencial, 0,36 cm³ cm⁻³. A condutividade hidráulica na meia encosta E22 foi menor na camada de 10-20 cm que de 0-10 cm. Na saturação, a condutividade no ombro foi praticamente a mesma nas duas profundidades. Da mesma forma que na curva de retenção, as curvas de condutividade na E22 incorreram em mais heterogeneidades, em função das variações texturais e hidrodinâmicas, do que na E2.

A E2 apresentou curvas de condutividade hidráulica (Figura 6) que remetem ao comportamento da curva de retenção, porém com as linhas mais próximas que na curva de retenção em todas as posições. Logo, são poucas as diferenças de velocidade de infiltração, em razão das semelhanças granulométricas e da densidade do solo (Tabela 3). Na camada de 10-20 cm a condutividade no pedimento foi menor que no ombro e meia encosta para a umidade acima de 0,29 cm³ cm⁻³. Em todas as umidades avaliadas, a 0-10 cm de profundidade, a maior velocidade de infiltração foi obtida no ombro, seguido do pedimento.

Os resultados obtidos, nessa pesquisa, têm relação direta com alguns dos serviços ecossistêmicos prestados pelo solo, no tocante ao armazenamento e disponibilidade de água associados à produção da pastagem e a emissão de carbono para a atmosfera. Na presente pesquisa, as posições com as menores retenções de água, estimados pelo modelo de Van Genuchten (1980), foi onde se observou as maiores produções de pastagem e emissões de CO₂ do solo para a atmosfera.

2.6. CONCLUSÕES

1. A granulometria do solo influenciou as características hidrodinâmicas, resultando em diferenças nas curvas de retenção- $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica- $K(\theta)$ entre as encostas. O aumento na retenção de água relacionou-se com o aumento nos teores de argila, independentemente da posição no relevo, mas diferiu na quantidade de água retida em função do tempo de uso da pastagem.
2. Na encosta sob pastagem com 22 anos de uso predominou o efeito da capilaridade no armazenamento de água, por isso nas posições do ombro e meia encosta, que são mais sujeitas aos efeitos da gravidade, há maior armazenamento de água que no pedimento.
3. Na encosta sob pastagem com 2 anos de uso, o efeito gravitacional atuou na retirada de água da encosta e influenciou no armazenamento de água, independentemente da posição topográfica e da profundidade do solo.

2.7. REFERÊNCIAS

- AIELLO, R.; BAGARELLO, V.; BARBAGALLO, S.; CONSOLI, S.; DI PRIMA, S.; GIORDANO, G.; IOVINO, M. An assessment of the Beerkan method for determining the hydraulic properties of a sandy loam soil. **Geoderma**, v. 235–236, p. 300–307, 2014.
- ALAGNA, V.; BAGARELLO, V.; PRIMA, S. DI; GIORDANO, G.; IOVINO, M. Testing infiltration run effects on the estimated water transmission properties of a sandy-loam soil. **Geoderma**, v. 267, p. 24–33, 2016.
- ANDRADE JUNIOR, A.S.; SILVA, C.R.; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.2, n.4, p.303-307, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -ABNT. NBR 07181: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.
- BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; IOVINO, M. Estimating saturated soil hydraulic conductivity by the near steady-state phase of a Beerkan infiltration test. **Geoderma**, v.303, p.70–77, 2017.
- BEVINGTON, J.; PIRAGNOLO, D.; TEATINI, P.; VELLIDIS, G.; MORARI, F. On the spatial variability of soil hydraulic properties in a Holocene coastal farmland. **Geoderma**, v. 262, p. 294–305, 2016.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology**. Paper, v.3, Fort Collins: Colorado State University, 1964. 37p.
- BURDINE, N. T. **Relative permeability calculation from size distribution data**. America Institute Mining and Metallurgy Engineering, v.198, p.71-78, 1953.
- CASTELLINI, M.; DI PRIMA, S.; IOVINO, M. An assessment of the BEST procedure to estimate the soil water retention curve: A comparison with the evaporation method. **Geoderma**, v.320, p.82–94, 2018.
- DI PRIMA, S.; BAGARELLO, V.; LASSABATERE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; BAUTISTA, I.; BURGNET, M.; CERDÀ, A.; IOVINO, M.; PROSDOCIMI, M. Comparing Beerkan infiltration tests with rainfall simulation experiments for hydraulic characterization of a sandy-loam soil. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 20, p. 3520–3532, 2017.
- DYMOND, S. F.; BRADFORD, J. B.; BOLSTAD, P. V.; KOLKA, R. K.; SEBESTYEN, S. D.; DESUTTER, T. M. Topographic, edaphic, and vegetative controls on plant-available water. **Ecohydrology**, v. 10, n. 8, p. 1–12, 2017.
- GALVÃO, S.R.S; SALCEDO, I.H.; SANTOS, A.C. Frações de carbono e nitrogênio em função da textura, do relevo e do uso do solo na microbacia do agreste em Vaca Brava (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.955-962, 2005.

GHAVIDELFAR, S.; SHAMSELDIN, A., Y.; MELVILLE, B., W.; Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty through the Beerkan infiltration experiment. **Hydrological Processes**, v.29, p.3699-3713, 2015.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y. Predicting the water retention curve from particle size distribution: I Sandy soils without organic matter. **Soil Science**, v.142, p.325–335, 1986.

HAWTHORNE, S.; MINIAT, C.F. Topography may mitigate drought effects on vegetation along a hillslope gradient. **Ecohydrology**, v.11, n.1825, 2018.

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA UGALDE, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, n.2, p.521-532, 2006.

LEE, E.; KIM, S.; Seasonal and spatial characterization of soil moisture and soil water tension in a steep hillslope. **Journal of Hydrology**, v.568, p.676-685, 2019.

MA, D.; ZHANG, J.; HORTON, R.; WANG, Q.; LAI, J. Analytical method to determine soil hydraulic properties from vertical infiltration experiments. **Soil Science Society of America Journal**, V.81, N.6, p.1303-1314, 2017.

MEI, X.; ZHU, Q.; MA, L.; ZHANG, D.; LIU, H.; XUE, M. The spatial variability of soil water storage and its controlling factors during dry and wet periods on loess hillslopes. **Catena**, v. 162, p. 333–344, 2018.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. A. S.; SOUZA, E. S.; CORREA, M. M.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, R. M. S.; SILVA FILHO, L. A. Variabilidade espacial de propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico sob pastagem e caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 631–639, 2014.

REBEQUI, A.M. **Dinâmica da água, do carbono e da produtividade em encosta sob pastagem**. 2015, 54 p. II. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2015.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 2.ed. Barueri, Manole, 2012. 524p.

ROULIER, S.; ANGULO-JARAMILLO R.; BRESSON, L. M.; AUZET, A. V.; GAUDET, J. P.; BARIAC, T. Water transfer and mobile water content measurement in a cultivated crusted soil. **Soil Science**, v.167, p.201-210, 2002.

SANTOS, A.C.; SALCEDO, I.H. Relevo e fertilidade do solo em diferentes estratos da cobertura vegetal na bacia hidrográfica da represa Vaca Brava, Areia, PB. **Revista Árvore**, v.34, n.2, p.277-285, 2010.

SANTOS, A.C.; SALCEDO, I.H; CANDEIAS, A.L.B. Relação entre o relevo e as classes texturais do solo na microbacia hidrográfica de Vaca Brava, PB. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.54, p.86-94, 2002.

SANTOS, G. L.; PEREIRA, M. G.; LIMA, S. S.; CEDDIA, M. B.; MENDONÇA, V. M. M.; DELGADO, R. C. Landform curvature and its effect on the spatial variability of soil attributes, Pinheiral-RJ/BR. **Cerne**, v.22, n.4, p.431-438, 2016.

SENTEK. **Diviner 2000: user guide version 1.5**. Stepney: Sentek Pty Ltd, 2009.

SILVA, A.P.; RESENDE A. S.; CHAER, G. M.; GONÇALVES, F. L. A.; CAMPELLO, F. C. Influência da forma e posição da encosta nas características do solo e na regeneração natural em áreas de pastagem abandonadas. **Ciência Florestal**, v.28, n. 3, p.1239-1252, 2018.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.128-135, 2008.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; HECK, R. J.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIMA, J. R. S.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ANGULO-JARAMILLO, R.; VAUCLIN, M. Effect of crusting on the physical and hydraulic properties of a soil cropped with castor beans (*Ricinus communis* L.) in the northeastern region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 141, p. 55–61, 2014.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

WHITE, I.; SULLY, M. J. Macroscopic and microscopic capillary length and times scales from field infiltration. **Water Resources Research**, v.23, n.8, p.1514-1522, 1987.

XIAO, B.; SUN, F.; HU, K.; KIDRON, G. J. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem. **Journal of Hydrology**, v.568, p.792-802, 2019.

PESSOA, Tiago de Carvalho. **Dinâmica da água e qualidade de pastagens no efluxo de CO₂ em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2019.

3. CAPÍTULO II: Efluxo de CO₂ na produção de serrapilheira e pastagem de *Urochloa decumbens* em Argissolo

3.1. RESUMO

Pastagens cultivadas sem adubação dependem da ciclagem dos nutrientes provenientes da serrapilheira e das excretas dos animais. No entanto, a contribuição da serrapilheira no fornecimento de nutrientes, o efluxo de CO₂ do solo e a produção da pastagem são pouco pesquisados. Esse trabalho objetivou avaliar o efluxo de CO₂ do solo, a produção e qualidade da forragem e da serrapilheira de *Urochloa decumbens*, em três posições do relevo em uma encosta de Argissolo Vermelho Amarelo. O trabalho foi realizado na microbacia hidrográfica de Vaca Brava, Areia-PB. A produção de forragem foi avaliada, mensalmente, em gaiolas de exclusão, a serrapilheira em anel de infiltração, o efluxo de CO₂ em câmaras estáticas e a umidade do solo por reflectometria no domínio da frequência (FDR). As variáveis analisadas foram: umidade volumétrica (θ), caracterização física e química do solo e qualidade da serrapilheira e da forragem; produção de matéria seca da serrapilheira + forragem, concentração de N e P na serrapilheira e na forragem, efluxo de CO₂ do solo e decomposição da serrapilheira. Na análise de componentes principais (ACP), os íons Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, a acidez potencial e a umidade do solo foram maiores no ombro e meia encosta, onde há maior concentração de matéria orgânica e argila. K⁺, Na⁺, efluxo de CO₂, areia e porosidade total são maiores no pedimento, posição que armazena menos água. Houve correlação positiva entre efluxo de CO₂ do solo e matéria seca de serrapilheira + forragem. Pela ACP a serrapilheira contribuiu mais que a forragem de *Urochloa decumbens* para a produção de matéria seca, principalmente na posição do pedimento, portanto o ambiente foi mais favorável a morte da gramínea. Existe correlação muito forte entre P e N na matéria seca, indicando sinergismo desses dois nutrientes. O menor tempo de meia vida (T_{0.5}) da massa de serrapilheira da *U. decumbens* foi no pedimento (66 dias). Isso indica que no pedimento, em pouco mais de dois meses, metade do N e P contidos na serrapilheira foram disponibilizados no solo.

Palavras-chave: Toposequência; Granulometria do solo; Umidade do solo;

PESSOA, Tiago de Carvalho. **Water dynamics and grassland quality in the efflux of CO₂ on hillslopes of Yellow Red Ultisol**. 2019. Thesis (Doctorate in Soil Science) - Post Graduate Program in Soil Science, Federal University of Paraiba, Areia, 2019.

Efflux of CO₂ in the litter and grassland production of *Urochloa decumbens* in Ultisol

3.2. ABSTRACT

Cultivated grasslands without fertilization depend on the cycling of nutrients from the litter and from the excreta of the animals. However, the contribution of litter to nutrient supply, soil CO₂ efflux and grassland production are little researched. The aim of this work was to evaluate soil CO₂ efflux, the production and quality of forage and *Urochloa decumbens* litter, in three relief positions on a slope of Yellow Red Ultisol. The work was developed in the Vaca Brava watershed, Areia-PB. The forage production was evaluated, monthly, in exclusion Cage, the infiltration ring litter, the efflux of CO₂ in static chambers and the soil moisture by frequency domain reflectometry (FDR). The analyzed variables were the volumetric moisture (θ), the physical and chemical characterization of the soil and bromatological in the litter and forage; the dry matter production of the litter + forage, the N and P concentration in the litter and forage, the efflux of CO₂ from the soil and the decomposition of litter. In the analysis of main components (PCA), the ions Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, the potential acidity and soil moisture are higher in the shoulder and backslopes, where there is a higher concentration of carbon and clay. K⁺, Na⁺, CO₂ efflux, sand and total porosity are higher in the footslope, position that has less stored water. There is a positive correlation between efflux of CO₂ from the soil and dry matter of litter and forage, and negative correlation between these and θ , CO₂ efflux being the most important variable among them. There is a very strong correlation between P and N in the dry matter, indicating synergism of these two nutrients. The litter contributed more than the *Urochloa decumbens* forage for dry matter production, mainly in the footslope position, so the environment was more favorable to grass death. The half-life (T_{0.5}) of *U. decumbens* litter mass was lower in the footslope (66 days). This indicates that in the footslope, in just over two months, half of the N and P contained in the litter can be made available in the soil.

Keywords: Landscape; Granulometry of soil; Moisture of soil;

3.3. INTRODUÇÃO

As pastagens são uma das vegetações mais representativas do planeta, contabilizando cerca de 20% da área terrestre global (ZHENG et al., 2018). No Brasil, dos aproximadamente 180 milhões de hectares das pastagens (MARTUSCELLO et al., 2009) 80% a 90% são compostas por gramíneas do gênero *Urochloa* (SOUZA et al., 2016). Cerca de metade desses percentuais são constituídos pela espécie *Urochloa decumbens*. As pastagens são a principal fonte de alimentos para bovinos no Brasil (SOUZA et al., 2016).

Entretanto, o uso intensivo das pastagens por longo tempo, sem a reposição de nutrientes, só é possível devido a reciclagem dos nutrientes da serrapilheira, entre eles o nitrogênio (N) e o fósforo (P). Desse modo, pequenas reposições de nutrientes ao solo são suficientes para um aumento na produção das pastagens (KIZEKOVÁ et al., 2018). A serrapilheira, em áreas de pastagens, garante maior oferta de nutrientes ao solo ao longo do ano (ZAGATO et al., 2018).

O N e P na biomassa da serrapilheira também é resultado da disponibilidade desses elementos no solo e na forragem da pastagem, o que pode ser influenciado por vários fatores edáficos e pela dinâmica da serrapilheira, que influencia o crescimento microbiano e as taxas de decomposição, regulando parcialmente a disponibilidade de nutrientes ao solo e o sequestro de carbono (SUN et al., 2019).

Além dos nutrientes disponíveis, o acúmulo ou decomposição do resíduo sofre influência da estação do ano, da qualidade da forragem, pisoteio animal e das condições climáticas, principalmente da umidade, que determina um microclima favorável ou não, para o aumento da decomposição (D'ANDRÉA et al., 2011; SILVA et al., 2018).

A disponibilidade de N e P, pela mineralização da matéria orgânica, resulta na oxidação de carbono (C) e produção de CO₂ (ZAGATO et al., 2018). Em solos com teor de C semelhante, o fluxo de CO₂ será maior onde houver a maior quantidade de serrapilheira depositada no solo (D'ANDRÉA et al., 2011). Os ciclos de C, N e P estão intimamente ligados através da decomposição da matéria orgânica e da respiração do ecossistema (TIAN et al., 2018). Assim, a composição química afeta, significativamente, as mudanças temporais nos processos de decomposição e no fluxo de CO₂ do solo (XU et al., 2018).

O período com maior mineralização de serrapilheira coincide com a estação chuvosa (ZAGATO et al., 2018), que também é o período com maior produção da pastagem. A decomposição dessa serrapilheira durante a estação de crescimento da pastagem exerce influência contínua no fornecimento de nutrientes para as plantas

(DUBEUX Jr. et al., 2006). Essa dinâmica é controlada pela qualidade do resíduo, determinada principalmente pelas concentrações de C, N, P, celulose e lignina.

Outro fator que controla o acúmulo, decomposição e a relação entre os nutrientes do solo e os absorvidos pela planta, além dos fatores edafoclimáticos e dos relacionados à qualidade da serrapilheira, é a topografia. Principalmente em áreas de encostas, que possuam variação na granulometria do solo, nas diferentes posições do relevo; porque o armazenamento de água e os nutrientes são influenciados, significativamente, pela textura do solo (WU et al., 2016; TIAN et al., 2018).

Um fator importante em favor da serrapilheira da forragem é a sua distribuição uniforme ao longo da pastagem, em função da constante senescência foliar, devido ao pastejo bovino e a fisiologia da planta. Sob a hipótese de que em área de encosta sob pastagem o efluxo de CO₂, a produção de pasto e a decomposição da serrapilheira estão relacionados à posição no relevo, porque entre as posições há variação no conteúdo de água no solo. Assim, objetivou-se avaliar o efluxo de CO₂ na produção e qualidade da forragem e da serrapilheira de *Urochloa decumbens*, em três posições do relevo em uma encosta de Argissolo Vermelho Amarelo.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1. Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida na microbacia hidrográfica de Vaca Brava (06°57'48" e 06°59'43" de latitude S e 35°44'03" e 35°45'59" de longitude O) que possui predominantemente dois tipos de uso do solo, uma área de reserva ecológica e outra de agropecuária familiar (794 ha), que juntas ocupam uma superfície de 1.500 ha distribuídas entre os municípios de Areia/PB e Remígio/PB. Na área usada pela agricultura familiar, a pastagem é o tipo de uso com maior abrangência, em função da pecuária ser a principal atividade econômica desta região (GALVÃO, SALCEDO e SANTOS, 2005), onde a criação de animais é extensiva.

A maior parte da microbacia está localizada no município de Areia/PB. Na qual segundo a classificação de Alvares et al. (2013), predomina o clima do tipo As', que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono e inverno, com estação seca podendo atingir entre 5 e 6 meses; pluviometria anual variando entre 900 e 1.400 mm, concentradas nos meses de abril a julho e com período seco entre setembro e fevereiro. As temperaturas anuais apresentam média de 24°C. A outra parte da microbacia que se

localiza no município de Remígio/PB, apresenta características edafoclimáticas de transição e marcante declínio na pluviosidade anual (média 820 mm).

A microbacia possui uma altitude média de 637 m, com relevo ondulado a fortemente ondulado, e em algumas áreas, relevo menos declivoso. A encosta avaliada localiza-se em área de transição entre os municípios de Areia e Remigóio.

3.4.2. Classificação da encosta

As distintas posições da encosta Figura 1, possuem o mesmo solo (Argissolo Vermelho Amarelo), gênero e espécie de gramínea formadora do pasto, presença de pastejo por bovinos e mesma idade de cultivo. A encosta localiza-se a 6°57'55,9" de latitude S e 35°46'14,4" de longitude O, apresenta forma convexa e está inserida numa área de 13 hectares.

É constituída de pastagem de *Urochloa decumbens* estabelecida há 22 anos, após escarificação para descompactação do solo, seguida de uma aração para desfragmentação dos agregados, não havendo semeadura de novas sementes, o estabelecimento da pastagem foi oriundo da germinação das sementes presentes no pasto incorporado ao solo. Na tabela 1, estão as informações resumidas da pastagem e do relevo da encosta.

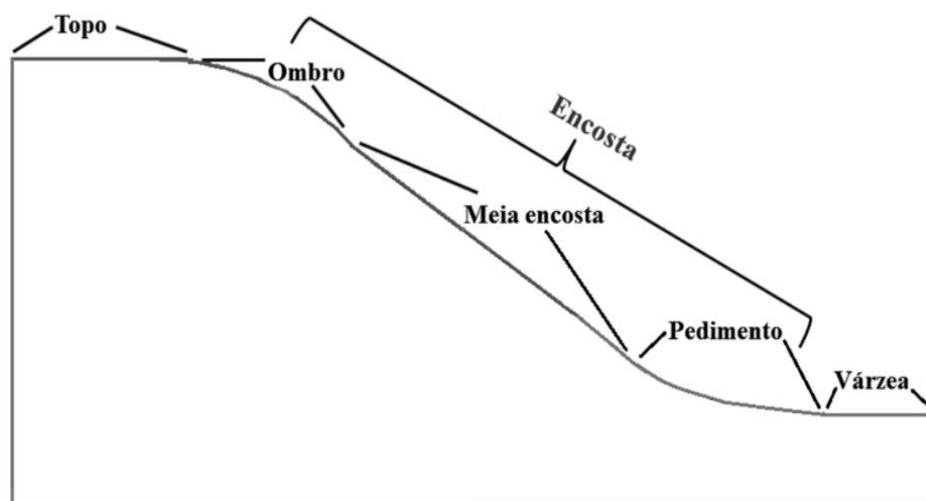


Figura 1. Posições do relevo na encosta (SANTOS, SALCEDO e CANDEIAS, 2002).

Tabela 1. Características da pastagem e do relevo na encosta

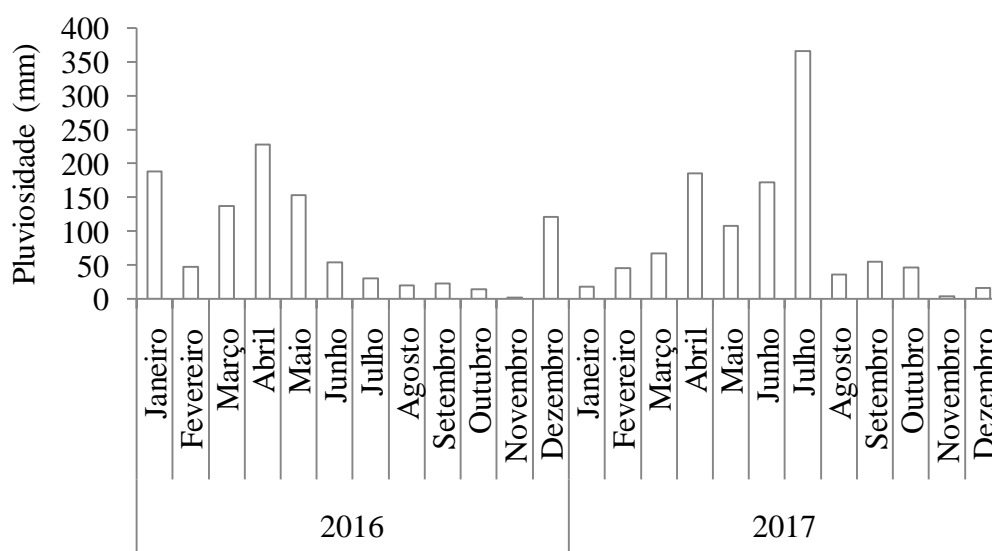
Características	Descrição
¹ Tempo de implantação da pastagem	22 anos
Área de pastejo (ha)	13
² Lotação animal (UA ha ⁻¹)	2,21
Forma de exploração	Baixa tecnologia
Manutenção	Arranquio de invasoras
Forma de exploração	Consumo total do pasto
Pousio	Para rebrota do pasto
Forma da encosta	Convexa
Comprimento de rampa	60 m
Ombro	16
³ Declividade das posições (%)	Meia encosta 21 Pedimento 16

¹As avaliações foram realizadas no 21º e 22º anos de implantação da pastagem; ²UA= Unidade animal;

³Ombro e Meia encosta= 16 m de comprimento de rampa; Pedimento= 12 m de comprimento de rampa.

3.4.3. Precipitação pluvial e umidade do solo

A precipitação pluvial, como pode ser verificado na Figura 2, foi monitorada durante os dois anos de avaliação, em uma estação meteorológica automatizada. Instalada na área de estudo.

**Figura 2.** Pluviosidade mensal nos anos de 2016 e 2017

Vale salientar que o período experimental compreendeu os meses de maio a outubro do ano de 2016, e os meses de janeiro a outubro no ano de 2017.

A umidade volumétrica do solo, durante os 15 meses de avaliação, foi determinada na camada de 0-20 cm, nas três posições do relevo, no sentido do declive da encosta. Para isso, utilizou-se uma sonda de capacitância (modelo Diviner 2000); que ao ser inserida em um tubo de acesso no solo, provê automaticamente leituras do conteúdo da água, em frequência dielétrica, a cada 10 cm de profundidade.

Esse valor, em frequência da água, foi transformado em umidade volumétrica, através do uso da curva de calibração determinada por Rebequi (2015). As leituras foram realizadas em três repetições por posição.

3.4.4. Caracterização física e química do solo

Foram coletadas amostras de solo, deformadas, nas três posições da encosta, na camada de 0-20 cm de profundidade (onde ocorre a maior concentração do sistema radicular da *Urochloa*), secas ao ar e tamisadas em peneira de 2 mm, para caracterização física: granulometria, porosidade total, densidade de partículas, argila dispersa em água (TEIXEIRA et al., 2017); e química: pH, bases trocáveis, acidez trocável, fósforo e potássio extraíveis por Mehlich-1 (TEIXEIRA et al., 2017); além de carbono orgânico total (COT) (SNYDER e TROFYMOW, 1984). Também foram coletadas amostras de solo indeformadas com anel volumétrico, para a determinação da densidade do solo.

3.4.5. Produção de forragem

A produção e o conteúdo de nitrogênio (N) e fósforo (P) na matéria seca da pastagem de *Urochloa decumbens*, foram avaliados mensalmente em três posições do relevo (ombro, meia encosta e pedimento), durante 15 meses (maio a setembro de 2016 e janeiro a outubro de 2017).

Para isso, utilizaram-se gaiolas de exclusão, que tem por finalidade evitar o consumo da planta forrageira pelos animais, permitindo assim, estimar a produção de pasto em sistemas de pastejo (MACIEL et al., 2014). Com esse fim, foram fabricadas gaiolas de exclusão com área de 0,160 m², com barras de ferro ¾ nas dimensões de 0,40 m de comprimento, 0,40 m de largura e 0,60 m de altura (sendo 0,20 m da altura destinada para fixação) e revestidas com tela de arame galvanizado número 18, com auxílio de alicate e arame liso.

O pasto dentro da gaiola de exclusão foi cortado na mesma altura do pasto de fora das gaiolas (consumidos pelos animais) representando a altura de pastejo dos animais, com uso de tesouras, a cada 30 dias. Após cada corte mudou-se as gaiolas de lugar, sempre obedecendo à declividade de cada posição na encosta, enquanto, o pasto coletado foi

armazenado em sacos de papel previamente identificados, secos em estufa a 65°C até peso constante, para determinação da matéria seca.

Em seguida foi moído e digerido com mistura de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (THOMAS et al., 1967) para análises dos teores de P (MURPHY e RYLEY, 1962) e N total pelo método de Kjeldahl (BREMMER e MULVANEY, 1982).

3.4.6. Produção de Serrapilheira

A produção de serrapilheira de *Urochloa decumbens* seguindo a metodologia elaborada por Rebequi (2015), foi avaliada, mensalmente, em três posições do relevo (ombro, meia encosta e pedimento), durante 15 meses (maio a outubro de 2016 e fevereiro a outubro de 2017) em função do crescimento do pasto.

A serrapilheira foi coletada por diferença de densidade entre a água e os resíduos vegetais. Para isso, adicionou-se água dentro de um anel de infiltração (área de 0,196 m²) fixado ao solo, até que fosse possível coletar o material em suspensão (água + resíduos vegetais). O material coletado com becker foi rapidamente transferido para um balde, para evitar o uso excessivo de água, que vai infiltrando no solo.

A água e os resíduos vegetais, suspensos no balde, foram separados com peneiras de 2 e 0,5 mm sobrepostas, enquanto o material que permaneceu submerso no fundo do balde, junto com as partículas sólidas do solo, foram passados apenas na peneira de 2 mm.

Os restos vegetais das peneiras foram retirados com água limpa em balde também limpo. A separação definitiva dos resíduos vegetais, foi feita com uma peneira de 0,053 mm, em seguida acondicionou-se o resíduo vegetal em bacias plásticas identificadas, e colocadas imediatamente para secar a temperatura ambiente, no campo, até ser transportado ao laboratório.

No laboratório a serrapilheira foi seca em estufa a 50°C até atingir peso constante; pesada, moída e digerida com mistura de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (THOMAS et al., 1967) para análises dos teores de P (MURPHY e RYLEY, 1962) e N total pelo método de Kjeldahl (BREMMER e MULVANEY, 1982). A serrapilheira também foi digerida com uma mistura de ácido fosfórico e sulfúrico para determinação do teor de COT (SNYDER e TROFYMOW, 1984).

Os coeficientes de decomposição (k) da serrapilheira de cada uma das posições avaliadas foram obtidos a partir dos valores das massas remanescentes, verificados ao longo dos meses representativos do período de decomposição (fevereiro a julho), os quais

foram ajustados ao modelo exponencial (1), proposto por Thomas e Asakawa (1993), por progressão não linear, empregando-se o programa SigmaPlot® v.12.0.

$$Pt = a.e^{-k.t} \quad (1)$$

P_t é o peso seco restante a um tempo “t” e uma constante k de decomposição; a = quantidade inicial de matéria seca ($t=0$); t = tempo em dias; k = constante de decomposição.

A partir do valor do coeficiente k , calculou-se o tempo de meia vida ($t_{0,5}$) que é o tempo requerido para que ocorra o desaparecimento de metade da quantidade inicial de serrapilheira. Calculado através do logaritmo neperiano dividido pelo valor da taxa k . E o tempo de desaparecimento de 95% da serrapilheira foi calculado por $t_{0,95} = 3 / k$.

3.4.7. Análises bromatológicas

Na matéria seca da forragem e da serrapilheira de *Urochloa decumbens*, foram feitas análises bromatológicas, determinando o N total pelo método micro Kjeldahl, sendo, posteriormente, multiplicado pelo fator 6,25 para obtenção da proteína bruta (PB), segundo AOAC (1984); Carbono total (C) (SNYDER e TROFYMOW, 1984) e fibra em detergente ácido (FDA) conforme Rodrigues (2010). Na matéria seca da forragem de *Urochloa decumbens*, também foi quantificada a fibra em detergente neutro (FDN) e na matéria seca da serrapilheira de *Urochloa decumbens* foi determinada a celulose e a lignina (RODRIGUES, 2010).

3.4.8. Efluxo de C-CO₂

O efluxo de CO₂ do solo foi avaliado, mensalmente, em três posições do relevo (ombro, meia encosta e pedimento), durante 15 meses. As avaliações foram realizadas em dois anos, no período de maio a outubro de 2016 e de fevereiro a outubro de 2017.

O CO₂ de origem autotrófica e heterotrófica foi capturado na superfície do solo, usando a metodologia de Jenkinson e Powlson (1976) adaptada por Ivo e Salcedo (2012). Este método consiste na captura do dióxido de carbono (CO₂) dentro de câmaras estáticas, por 40 mL de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1 Mol L⁻¹ contidos em um recipiente, durante 24 horas.

As câmaras estáticas (Fotografia 1) consistiram de um recipiente cilíndrico (com diâmetro de 22,3 cm e altura de 8 cm) ocupando uma área de 0,0391 m², com suas bordas

voltadas ao solo, para proteger o recipiente interno, o qual continha o NaOH 1 N e possuía área de 0,0154 m².

Fotografia 1: Instalação da câmara estática



Fonte: Tiago de C. Pessoa (2017)

A quantificação do efluxo de CO₂ no campo consistiu dos seguintes passos: 1) Cortou-se a parte aérea das plantas no local, com auxílio de tesoura; 2) Colocou-se o recipiente com a solução de NaOH 1 N sobre o solo; 3) Cobriu-se o recipiente com a câmara estática; 4) Cobriram-se totalmente as bordas da câmara, para evitar o fluxo de CO₂ da câmara para atmosfera.

No tratamento controle (branco) o recipiente ficou tampado e protegido durante as 24 h em um saco plástico fechado, no entanto, o recipiente ficou exposto ao ar atmosférico pelo mesmo período dos demais tratamentos durante a colocação (\approx 5 segundos) e retirada (\approx 5 segundos) do recipiente, para retirar a contaminação com CO₂ atmosférico que ocorria durante esses procedimentos.

Completadas as 24 h, os recipientes foram retirados, tampados, armazenados, identificados e transportados até o laboratório, onde a solução de NaOH foi transferida para recipientes fechados e armazenados em refrigeração. O teor de CO₂ foi determinado por titulação potenciométrica com ácido clorídrico (HCl) a 0,05 N (SAMPAIO e SALCEDO, 1982).

3.4.9. Análise estatística

Na análise estatística dos dados, em virtude do grande número de variáveis e fatores (conjunto original) a serem explicadas, empregou-se a técnica da análise multivariada de componentes principais (ACP), para reduzir esse número de variáveis que se correlacionam, em agrupamento de dados similares, com perda mínima de informações.

Anteriormente à análise multivariada dos dados, estes foram padronizados (média/desvio-padrão), para assegurar que todas as variáveis contribuíssem igualmente para o modelo independentemente da escala pela qual elas foram medidas.

A matriz de correlação dos dados foi normalizada para 100%. O critério de decisão adotado para definir o número de componentes principais, a serem usados para interpretação dos resultados, foi o da escolha de tantos componentes possíveis até que fosse obtido em torno de 70% da explicação da variância dos dados. Os procedimentos estatísticos multivariados foram realizados utilizando-se o software estatístico R.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. Análise química da fertilidade do solo

Os dois componentes principais (CPs) foram responsáveis por 100% da variação total, sobre a fertilidade do solo nas três posições do relevo de uma encosta sob pastagem com vários anos de uso, em que o CP1 foi responsável por 84,58% e o CP2 por 15,42% da variância dos dados (Tabela 2). Com o CP1 correlacionado positivamente ao Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Acidez potencial (H+Al), Alumínio (Al) e Carbono Orgânico Total (COT), e negativamente com pH, Fósforo (P), Potássio (K) e Sódio (Na). E o CP2 correlacionado mais forte e positivamente ao Ca (Tabela 2).

Tabela 2. Matriz de correlação da caracterização química de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem

Autovalores	Componente principal 1 (CP1)	Componente principal 2 (CP2)
Variância	7,61	1,39
Variância (%)	84,58	15,42
Variância acumulada (%)	84,58	100
Variáveis	CP1	CP2
pH ¹	-0,99	0,16
P	-0,97	0,25
K	-0,98	0,17
Na	-0,86	-0,51
Ca	0,53	0,84
Mg	0,99	0,11
H+Al	1,00	-0,01
Al	0,85	-0,52
COT	1,00	0,03

¹ pH determinado em água (1:2,5); P= Fósforo; K= Potássio; Na= Sódio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio; H+Al= Hidrogênio+Alumínio (acidez potencial); Al= Alumínio; COT= Carbono orgânico total.

A matéria orgânica (MOS), representada pelos teores de carbono orgânico total (COT) e H+Al apresentaram a maior contribuição para o CP1, isto foi verificado pelo

comprimento do vetor e pela proximidade ao eixo CP1. No entanto, Ca é o elemento com menor correlação com o CP1, pois forma um ângulo próximo a 90° em relação ao eixo CP1, como mostrado na Figura 3.

A Figura 3 demonstra que o CP1 explica praticamente toda a variação dos dados formando dois grupos de dados bem distintos, o grupo 1 e o 2. O grupo 1 com Mg, H+Al, Al e COT e o grupo 2 com pH, P, K e Na. Enquanto o Ca foi mais bem explicado no CP2, onde se correlacionou negativamente com Al.

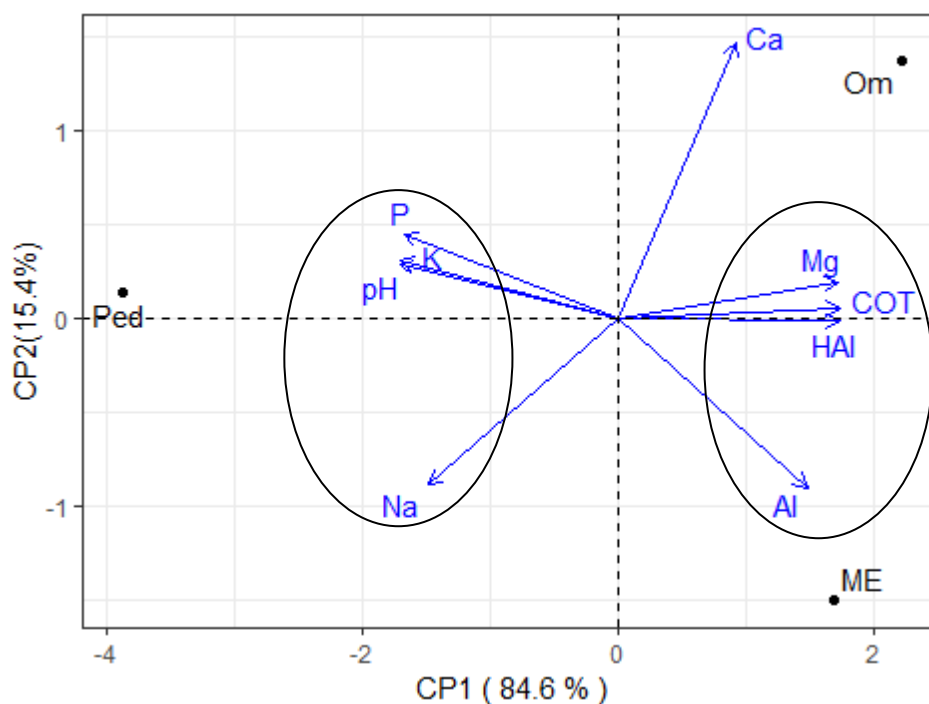


Figura 3. Análise de componentes principais da caracterização química de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem. Om: ombro, ME: meia encosta, Ped: pedimento; ¹pH determinado em água (1:2,5); P= Fósforo; K= Potássio; Na= Sódio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio; H+Al (HAl)= Hidrogênio+Alumínio (acidez potencial); Al= Alumínio; COT= Carbono orgânico total.

As variáveis dentro do grupo 1 correlacionam-se positivamente, da mesma maneira as variáveis dentro do grupo 2. Esses grupos indicam diferenças entre as posições do relevo. A correlação entre esses dois grupos de variáveis é negativa.

O aumento na MOS resultou em aumento na concentração de Ca, Mg, H+Al e Al. Entretanto, esse mesmo aumento em MOS, incidiram em diminuição do pH, P, K e Na, esses resultados estão sendo influenciados pela erosão hídrica na área, que tende a carrear os elementos menos retidos quimicamente às partículas de argila e MOS, do ombro e meia encosta para o pedimento que foi onde se concentraram os maiores valores de pH, P, K e Na.

Os íons de maior valência (Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+}) e a acidez potencial, concentraram-se onde há maior predominância de cargas negativas, ombro e meia encosta, justamente pela maior concentração de MOS nessas posições, como pode ser observados pelos valores de carbono (COT) da tabela 3. Vale salientar que essas posições estão sob os efeitos erosivos há mais de 20 anos e por isso, elementos que são fracamente retidos como K^+ e Na^+ foram lixiviados e carregados até o pedimento.

Quanto ao P que está mais concentrado na posição do pedimento, esse elemento também pode estar sendo retirado pelo efeito da erosão hídrica, das posições superiores e depositado no pedimento, Galvão, Salcedo e Oliveira (2008) observaram que a erosão hídrica tem efeito significativo na erosão de P.

Apesar da Figura 3, apresentar correlação entre a acidez potencial (H+Al) e o Mg, ressalta-se que os valores de Mg e Ca são classificados como baixo e H+Al como alto (Tabela 3) segundo Alvarez-Venegas et al. (1999). Esta correlação pode ser explicada pela capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, pois se correlacionaram com as posições do relevo mais argilosas e com maior teor de matéria orgânica, onde se encontram mais cargas elétricas disponíveis.

Tabela 3. Caracterização química da fertilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem.

Posição	pH ¹	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺	CTC	COT
		---mg kg ⁻¹ ---				cmol _c kg ⁻¹				g kg ⁻¹
Ombro	5,44	2,45	104	0,02	0,74	0,48	6,12	0,10	7,63	14,4
M. encosta	5,40	2,23	69,3	0,03	0,51	0,47	5,91	0,15	7,10	13,8
Pedimento	5,83	3,40	399	0,04	0,52	0,43	3,34	0,04	5,34	9,4

⁽¹⁾ pH determinado em água (1:2,5); pH, Ca, Mg, H+Al, Al; Na, K e P (extraíveis por Mehlich-1), foram determinadas pela metodologia de Teixeira et al. (2017); COT (SNYDER e TROFYMOW, 1984); CTC (capacidade de troca de cátions) = S + (H+Al); S (soma de bases) = $\Sigma(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Na}, \text{K})$; K [cmol_c kg⁻¹].

Os teores de Ca são baixos e os de Al muito baixo nas três posições (ALVAREZ- VENEGAS et al., 1999), logo, Al não contribuiu significativamente para acidez potencial (H+Al). O pH do solo indica acidez média, nas três posições, embora na posição do pedimento tenha valor próximo a 6 (Tabela 3).

Vale salientar que as concentrações dos elementos químicos variaram entre as posições, como pode ser verificado na Figura 3; sendo pH, P, K e Na mais concentrados na posição do pedimento; Ca, Mg, H+Al mais concentrados na posição do ombro. A matéria orgânica, representada pelos valores de COT, concentrou-se no ombro e meia encosta, que foi a posição que teve maior concentração de Al (Tabela 3). Na literatura há trabalhos (WU

et al., 2016; TIAN et al., 2018) que também observaram, em áreas de encostas, os efeitos significativos da granulometria do solo sobre a concentração dos nutrientes.

3.5.2. Análise física do solo

A importância das variáveis de caracterização física do solo foi analisada pela sua correlação com os CPs (componentes principais) selecionados. Os dois CPs foram responsáveis por 100% da variação total (Tabela 4), sobre as características do solo nas três posições do relevo de uma encosta sob pastagem com mais de 20 anos de uso, em que o CP1 foi responsável por 83,3% e o CP2 por 16,7% das variações dos dados. Isto indica que as 7 variáveis estudadas podem ser substituídas por estes dois componentes, sem nenhuma perda de informação.

Tabela 4. Matriz de correlação da caracterização física de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem

Autovalores	Componente principal 1 (CP1)	Componente principal 2 (CP2)
Variância	5,83	1,17
Variância (%)	83,32	16,68
Variância acumulada (%)	83,32	100
Variáveis	CP1	CP2
AT	-0,97	-0,25
Silte	-0,34	0,94
Arg	0,99	0,15
ADA	0,99	0,10
Ds	0,99	0,10
Dp	0,91	-0,41
PT	-0,99	-0,10

AT = Areia total; Arg= Argila; ADA = Argila dispersa em água; Ds = Densidade do solo; Dp= densidade de partícula; PT = Porosidade total.

Na Figura 4 podemos observar que o CP1 está correlacionado positivamente à Argila (Arg), Densidade do solo (Ds), Argila dispersa em água (ADA) e Densidade de partícula (Dp); e negativamente com Areia total (AT), Silte e Porosidade total (PT). Pela distância da variável Silte em relação ao eixo CP1, nota-se que ele tem correlação fraca com esse componente. O CP2 correlacionou-se positivamente com o Silte e negativamente com a Dp, e apresentou correlação muito fraca com as demais variáveis.

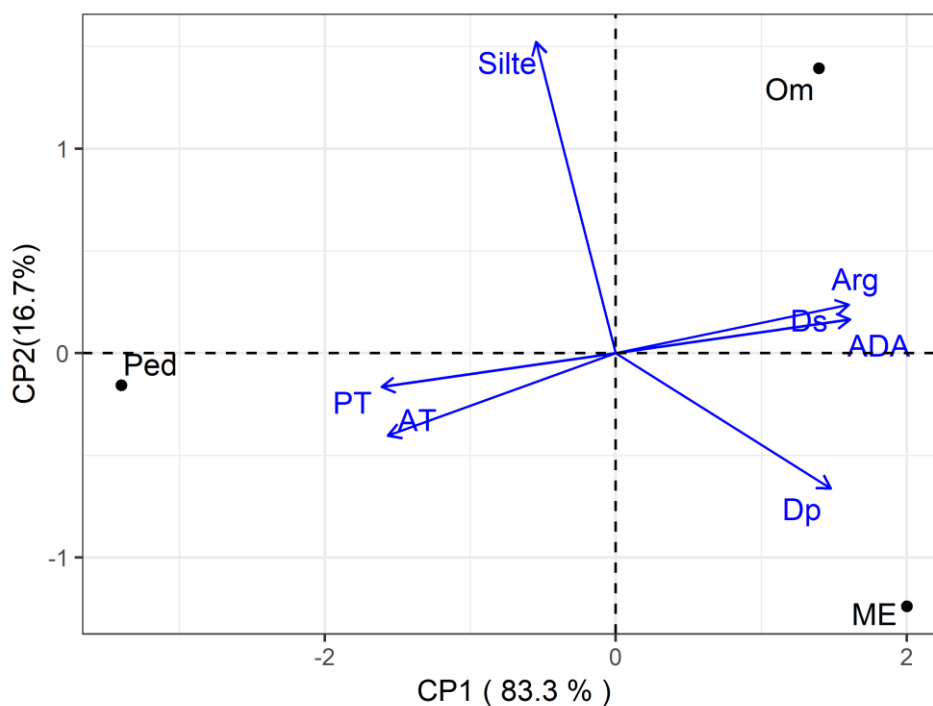


Figura 4. Análise de componentes principais da caracterização física de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem. Om: ombro; ME: meia encosta; Ped: pedimento; AT = Areia total; Arg= Argila; ADA = Argila dispersa em água; Ds = Densidade do solo; Dp= densidade de partícula; PT = Porosidade total.

No CP1 à medida que se aumentam os teores de Arg, diminuem-se os teores de AT. Indicando os efeitos da erosão na modificação das características físicas do solo na encosta, onde, no pedimento predomina deposição das partículas mais grossas do solo (AT), menos agregadas, retiradas das posições superiores e a porosidade, enquanto no ombro e meia encosta mais declivosas e mais susceptíveis a erosão, predomina a Arg, a maior Ds nessas duas posições tem haver com o sobrepastoreio bovino, que está induzindo a uma maior compactação do solo nessas posições.

No CP2 o maior teor de Silte no ombro, posição com a maior cota topográfica, comprova que as frações de tamanho menor que areia estão sofrendo pouco ou nenhum efeito da erosão, em função da maior agregação entre as partículas menores e a matéria orgânica do solo, além disso, o sódio que é um dispersante de argilas, está em maior concentração no pedimento e menor no ombro e meia encosta (Tabela 3).

3.5.3. Serrapilheira e forragem de *Urochloa decumbens*, efluxo de CO₂ e umidade do solo

Analisando a serrapilheira e a forragem de *Urochloa decumbens*, o efluxo de CO₂ e a umidade do solo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem com mais de 20 anos de uso. Observou-se que os dois CPs foram responsáveis por 91% da variância acumulada, em que o CP1 foi responsável por 51,85% e o CP2 por 39,3% da variância dos dados (Tabela 5). Indicando que as 5 variáveis estudadas podem ser substituídas por estes dois componentes, com perda mínima de informação.

Tabela 5. Matriz de correlação das variáveis analisadas na serrapilheira e na forragem de *Urochloa decumbens*, efluxo de CO₂ e umidade do solo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem

Autovalores	Componente principal 1 (CP1)	Componente principal 2 (CP2)
Variância	2,59	1,96
Variância (%)	51,85	39,30
Variância acumulada (%)	51,85	91,15
Variáveis	CP1	CP2
MS	0,84	-0,27
P	0,29	0,91
N	0,26	0,93
O (θ)	-0,89	0,04
CO2	0,97	0,02

MS= matéria seca; P= Fósforo; N= Nitrogênio; O (θ)= Umidade volumétrica do solo (cm³ cm⁻³); CO2= efluxo de CO₂ do solo.

O CP1 correlacionou-se significativamente com o efluxo de CO₂ (CO₂) e com a matéria seca de serrapilheira e forragem (MS), e negativamente com a umidade do solo (θ), como pode ser verificado na tabela 5, além disso, o CP1 apresentou correlação muito fraca com fósforo (P) e nitrogênio (N). O CP2 apresentou correlação fraca com MS, não tem correlação com θ, nem com CO₂, porém apresenta correlação muito forte com P e N (Tabela 5).

Vale salientar que os nutrientes estão apresentados em teor (mg g⁻¹) e não em conteúdo (teor do nutriente em relação a massa produzida pela planta) daí essa fraca correlação positiva entre N, P e MS no CP1 como pode ser verificado pela angulação dos vetores dessas variáveis na Figura 5; e correlação negativa entre a MS e os teores de N e P no CP2. Outro aspecto a ressaltar é que os teores de P no solo são muito baixos; da mesma forma os de matéria orgânica a quem, nessas áreas, o N está associado (GALVÃO et al., 2005), também são considerados baixos, logo, ao se analisar os teores na planta houve um reflexo do que ocorre no solo (Tabela 3).

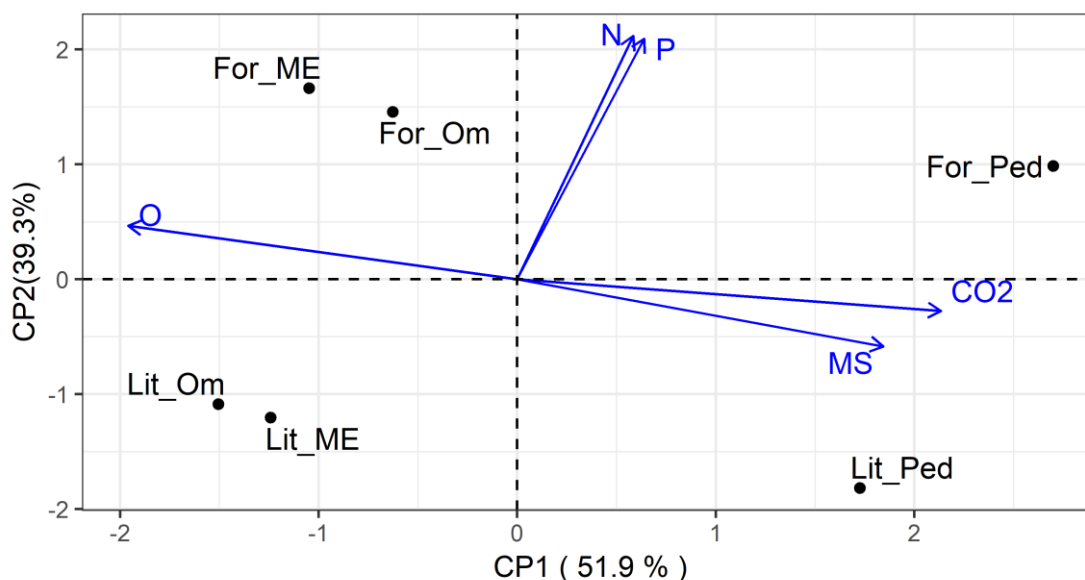


Figura 5. Análise de componentes principais da serrapilheira e da forragem de *Urochloa decumbens*, efluxo de CO₂ e umidade do solo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em uma encosta sob pastagem. Om: ombro, ME: meia encosta, Ped: pedimento; MS= matéria seca; P= Fósforo; N= Nitrogênio; O (θ)= Umidade volumétrica do solo (cm³ cm⁻³); CO₂= efluxo de CO₂ do solo.

A correlação negativa de θ com todas as variáveis do CP1 foi atípica, afinal a avaliação foi em condição de sequeiro e o crescimento vegetal, além da absorção de nutrientes são controladas pela umidade do solo, nessa condição. Entretanto, a avaliação dessas variáveis foi em dois anos distintos, e no segundo ano existiu uma intensificação no período chuvoso (Figura 2), a partir de dezembro do primeiro ano, houve precipitações bem elevadas na área.

De março até julho do segundo ano, as chuvas foram sempre próximas ou superiores a 100 mm por mês, com uma precipitação de mais de 350 mm no mês de julho. Isso se refletiu na umidade do solo na camada de 0-20 cm de profundidade, onde de maio a agosto a umidade esteve sempre com valores próximos ou na saturação (porosidade total).

Então, a PC1 está descrevendo que o excesso de água influiu de forma negativa e muito contundente no crescimento e na absorção dos nutrientes pela forragem; e isso pode ser confirmado pela correlação negativa entre θ e CO₂ que é a variável mais importante da PC1, dado o comprimento do vetor e a sua angulação em relação ao eixo. O excesso de água da chuva levou a saturação do solo, preenchendo os poros e impedindo a difusão das moléculas de CO₂ para a atmosfera. Resultando em perdas de nutrientes da encosta, alterando ainda mais a fertilidade ao longo do relevo.

É importante mencionar que de fato a massa de serrapilheira se correlaciona negativamente com θ , em qualquer condição, pois o acúmulo de serrapilheira ocorre no

período seco e a decomposição durante o período chuvoso. O período chuvoso coincide com maior mineralização de serrapilheira (ZAGATO et al., 2018; SILVA et al., 2018), que também é o período com maior produção da pastagem.

Pelo comprimento, sentido e angulação do vetor, nota-se uma correlação muito forte entre N, P e o CP2 (Figura 5) e muito forte entre esses dois elementos, também pelo comprimento e sentido do vetor é possível inferir que esses dois elementos contribuem de forma semelhante para o CP2; e que tem uma grande influência na absorção um do outro pela forragem, bem como na sua disponibilidade no solo pela serrapilheira.

No CP2 (Figura 5) não há correlação entre θ , CO₂, N e P; e a correlação existente entre esses dois nutrientes com a MS é muito fraca e negativa. Isto ocorreu devido haver produções de forragem e de serrapilheira mesmo em concentrações pequenas e decrescentes desses nutrientes.

O que, nas condições avaliadas, é um resultado extremamente relevante afinal essa área nunca recebeu adubação e sofre com o sobrepastoreio, como pode ser verificado na tabela 1. Demonstrando, desta maneira, que a extração de P e de N do solo, não apresenta uma relação linear com a produção de MS e assim pode haver altas produções de forragem e/ou de serrapilheira, com baixos teores de N e P extraídos ou disponibilizados no solo. Como já foi discutido por Kizeková et al. (2018) pequenas reposições de nutrientes ao solo, são suficientes para um aumento na produção das pastagens.

Analisando as relações das variáveis com as posições e o tipo de material (serrapilheira e forragem) da *Urochloa decumbens*, observamos que a maior produção de MS é de serrapilheira na posição do pedimento, ou seja, existe mais matéria seca de serrapilheira que de forragem na posição, em outras palavras, nos anos avaliados, o ambiente foi mais favorável a morte da gramínea.

Isso pode ter sido mais intensificado, no segundo ano, devido à saturação do solo, já mencionada anteriormente, e que podemos verificar na correlação negativa entre umidade e matéria seca, além do sobrepastoreio bovino (Tabela 1).

Em consequência da maior mortalidade da gramínea, nas condições já citadas, houve maior efluxo de CO₂ (Figura 5), corroborando com D'Andréa et al. (2011), que observaram que com a maior produção de serrapilheira há maior emissão de CO₂. A emissão de CO₂ relacionada à produção de forragem, no pedimento, também foi bastante elevada.

Como a posição do pedimento é a mais porosa (Figura 4) explica-se porque os maiores efluxos foram nessa posição, afinal, a saturação do solo nessas condições pode ter menor duração, e qualquer alteração no acúmulo de água resultaria na saída dos gases

retidos nos poros (ZAGATO et al., 2018). Ainda, como essa posição possui menor teor de argila em relação às demais (Figura 4) há menos possibilidade da retenção de gases por adsorção.

Verificamos os maiores acúmulos de θ (0-20 cm), no ombro e na meia encosta (Figura 5), isto está associado ao teor de argila nessas posições que é bem maior que no pedimento, como já foi descrito na Figura 4; e por isso, os menores valores de θ foram observados no pedimento, que possui menor teor de argila. Como as encostas são declivosas, tendem a sofrer ação da gravidade sobre as moléculas de água (retirada de água da encosta), portanto a microporosidade e as cargas elétricas, estão contribuindo na resistência à gravidade, através da força matricial (muito influenciada pela capilaridade) que atua para manter a água na encosta.

As combinações com maior concentração de N e P, todas com forragem, foram nas três posições (Figura 5). Os valores de N e P extraídos foram muito semelhantes nas três posições, o que indica que as diferentes características físicas (Figura 4) e os diferentes teores de nutrientes do solo (Figura 3), não influiriam de forma contundente na absorção de nutrientes.

Os teores de N e P na serrapilheira são muito baixos em relação aos teores encontrados na forragem, nas três posições. Mas, vale salientar que há mais produção de matéria seca de serrapilheira que de forragem, nas condições avaliadas, o que pode compensar os baixos teores desses nutrientes nesse material, levando em consideração a disponibilidade de N e P, por meio da decomposição e mineralização do resíduo.

3.5.4. Qualidade da serrapilheira e da forragem e decomposição da serrapilheira

Os resultados desse trabalho para fibra em detergente neutro (FDN), que variaram de 72 a 74% (Tabela 6), estão de acordo com os observados no banco de dados CQBAL 3.0 desenvolvido por Valadares-Filho et al. e atualizado em 2019, que foram em média de 73,1% de concentração para uma amostragem (n) de 19 trabalhos nacionais analisados, e um desvio padrão (s) de 5,38;.

Esse mesmo banco de dados observou em $n=26$ com $s=3,88$ um teor médio de fibra em detergente ácido (FDA) de 39,29%, nesse caso os teores de FDA que se observou na forragem *U. decumbens* na tabela 6 foi menor que essa média nacional de 39,29% em todas as posições. Esse resultado indica que há menos celulose e lignina nas condições avaliadas nesse trabalho. Conferindo melhor qualidade na forragem avaliada, em relação à média nacional da *U. decumbens*.

Tabela 6. Caracterização bromatológica da forragem de *Urochloa decumbens*

Posição	FDN	FDA	Carbono	Nitrogênio	Proteína Bruta
	-----%-----				
Ombro	74	29	25	1,4	8,75
Meia encosta	72	29	28	1,7	10,63
Pedimento	72	30	25	1,5	9,38

FDN= fibra em detergente neutro; FDA= fibra em detergente ácido;

A média nacional de proteína bruta é de 6,63% para n= 35 e s= 1,59; os resultados desse trabalho foram superiores aos nacionais em todas as posições; e maiores que os encontrados por outros autores para o gênero *Urochloa* (SANTOS et al., 2004; SILVA et al., 2004). Estes resultados também superaram os encontrados por Lima (2007) que caracterizou as pastagens da microbacia hidrográfica de vaca brava-PB, e encontrou valores médios de Proteína bruta de 3,10, 3,06 e 2,89, respectivamente, no terço superior (ombro), terço médio (meia encosta) e terço inferior (pedimento).

O valor crítico de proteína bruta é de 7% (ABREU et al., 2006), logo, a pastagem avaliada, no presente trabalho (Tabela 6), está com níveis acima do valor crítico e apresentou valores médios melhores que a média nacional para *Urochloa decumbens*. Tais informações são muito importantes, pois como não há adubação na área, a qualidade da forragem reflete em melhor qualidade da serrapilheira e consequentemente maior disponibilidade de nutrientes às plantas.

Como se pode observar na tabela 7, os teores de nitrogênio da serrapilheira são muito mais baixos que os da forragem, e os teores de FDA que é a soma de celulose e lignina e são os componentes da matéria orgânica mais resistentes a decomposição, são bem maiores na serrapilheira (Tabela 7) que na forragem (Tabela 6). Incidindo em dificuldade na decomposição e menor disponibilidade do N presente na serrapilheira. Entretanto as concentrações de carbono, em média, sofreram apenas um leve aumento de 1,2% da forragem para serrapilheira, o que indica que nessas condições os teores de carbono no tecido vegetal matem-se estáveis.

Tabela 7. Caracterização bromatológica da serrapilheira de *Urochloa decumbens*

Posição	Celulose	Lignina	FDA	Carbono	Nitrogênio	C:N
	-----%-----					
Ombro	35,2	11,2	46,3	28,8	0,76	38:1
Meia encosta	35,7	11,9	47,5	24,2	0,80	30:1
Pedimento	35,2	14,2	49,4	28,6	0,84	34:1

FDA= fibra em detergente ácido; C:N= relação carbono/nitrogênio

A serrapilheira da pastagem apresenta alta relação C:N nas três posições (Tabela 7), o que é normal em se tratando de serrapilheira de gramíneas, embora a qualidade da

serapilheira seja determinada pelos teores de: lignina, celulose, carbono, nitrogênio e outros nutrientes, entre outras substâncias.

Assim, o solo do pedimento compensa a baixa qualidade da serrapilheira (Tabela 7), com melhores condições para a maior atividade autotrófica e heterotrófica (efluxo de CO₂), maior circulação de ar, como pode ser verificado na Figura 4, e melhor condição à decomposição da serrapilheira acumulada na estação seca.

Embora a avaliação tenha sido realizada em 220 dias, a decomposição não ocorreu em todo o tempo do ensaio, ficando claro que existe uma amplitude de acúmulo e de decomposição do resíduo e que no período de decomposição, estação chuvosa, ocorre a produção de forragem e no período de acúmulo de serrapilheira, estação seca, cessa-se por completa a produção de forragem.

No ombro, a taxa de decomposição (k) (Figura 6) foi 1,79 vezes maior que na meia encosta; no pedimento; 3,75 vezes maior que na meia encosta e 1,9 vezes maior que no ombro; a decomposição foi mais intensa no pedimento em relação às demais posições, por isso o efluxo de CO₂ do solo é maior nessa posição como já discutido na Figura 5.

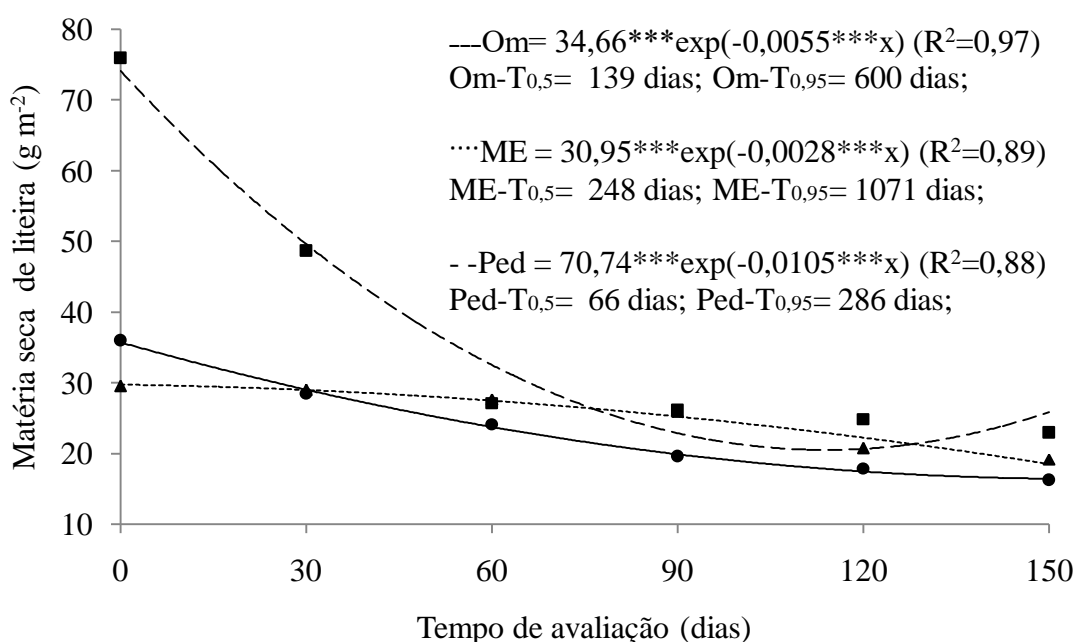


Figura 6. Taxa de decomposição da serrapilheira de *Urochloa decumbens* durante 150 dias de avaliação, nas posições do ombro (Om), meia encosta (ME) e pedimento (Ped). *Significativo pelo teste F (P<0,01).

Para as condições avaliadas, com a estação chuvosa dentro da variação histórica (900 a 1.400 mm ano⁻¹), o período de decomposição que avaliamos foi de fevereiro a julho (Figura 6). Rebequi (2015) avaliando a decomposição da serrapilheira na mesma encosta e posições, no ano 2013, também observou que a decomposição cessou no mês de julho. Tais similaridades indicam que o ecossistema está em equilíbrio, em relação ao ciclo

decomposição-produção. Porém, as taxas de decomposição (k) variaram, entre os dois trabalhos, o que comprova ainda mais, o efeito da precipitação pluvial no acréscimo ou decréscimo da decomposição, de um ano em relação ao outro.

Na posição do ombro foram necessários 139 dias para o desaparecimento de 50% da serrapilheira acumulada ($T_{0,5}$) e necessitaria de 600 dias para o desaparecimento de 95% da serrapilheira acumulada ($T_{0,95}$). Na meia encosta seriam necessários 248 dias para $T_{0,5}$ e 1071 dias para o $T_{0,95}$. Já no pedimento em 66 dias houve $T_{0,5}$ e em 286 dias ocorreria $T_{0,95}$.

Pelas estimativas, em pouco mais de 2 meses desapareceu metade da serrapilheira acumulada no pedimento, entretanto, não desapareceria toda a serrapilheira em um ano, como se estimou, pois o período de decomposição é de 150 dias (Figura 6) e o estimado foi de 286 dias, logo, sempre existirá resíduo de um ano para ser decomposto no outro. Metade da serrapilheira do ombro se decompôs na estação chuvosa do ano corrente. Seriam necessárias duas estações chuvosas (dois anos) para haver a decomposição de metade da serrapilheira na meia encosta, pois o período de decomposição é de 150 dias e são necessários 248 dias para decompor metade da serrapilheira na citada posição.

Um tempo de meia vida da serrapilheira de *U. decumbens* de 35 dias foi estimado por Xavier et al. (2011), no entanto, Silva et al. (2014) observaram um tempo de meia vida de 364,81 dias para plantas nativas, enquanto Grugiki et al. (2017) estimaram um tempo de meia vida de 394,36 dias para floresta secundária.

Observamos que entre os trabalhos supracitados, a maior taxa de decomposição ocorreu na serrapilheira da gramínea em relação às espécies florestais, indicando que a decomposição pode estar mais ligada a fatores edafoclimáticos que bromatológicos. O que explica as variações no tempo de meia vida da serrapilheira em função das posições no relevo.

3.6. CONCLUSÕES

1. A matéria seca da forragem apresentou melhor qualidade que a matéria seca da serrapilheira da pastagem, e correlação muito forte entre a absorção de P e N, o que indica sinergismo desses dois nutrientes, independentemente da posição no relevo.
2. O efluxo de CO_2 relacionou-se à posição no relevo, a produção do pasto e a decomposição da serrapilheira; na posição do pedimento ocorreu a maior produção da pastagem e decomposição da serrapilheira e o maior efluxo de CO_2 , ocorrendo o inverso disso na posição da meia encosta.

3.7. REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.
- ALVAREZ VENEGAS, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; E LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (eds). Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª aproximação. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Viçosa, MG, p.25-32, 1999.
- ANDRADE JUNIOR, A.S.; SILVA, C.R.; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.2, n.4, p.303-307, 2007.
- AOAC - ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. 14.ed. Arlington Virginia, 1141p, 1984.
- BREMNER, J.M.; MULVANEY, C.S. Nitrogen-total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties. Madison, Soil Science Society of America, 1982. Part 2. p.595-624.
- D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; SILVA, C. A. Variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo em povoamento de eucalipto. **Floresta**, v.41, n.2, p.407-422, 2011.
- DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; LIRA, M. D. A.; SANTOS, M. D.; CUNHA, M. D. Fluxo de nutrientes em ecossistemas de pastagens: impactos no ambiente e na produtividade. **Simpósio sobre o Manejo da Pastagem**, v.23, p.439-506, 2006.
- GALVÃO, S.R.S; SALCEDO, I.H.; SANTOS, A.C. Frações de carbono e nitrogênio em função da textura, do relevo e do uso do solo na microbacia do agreste em Vaca Brava (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.955-962, 2005.
- GALVÃO, S.R.S; SALCEDO, I.H.; OLIVEIRA, F.F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.1, p.99-105, 2008.
- GRUGIKI, M. A.; ANDRADE, F. V.; PASSOS, R. R.; CAROLYNA, A.; FERREIRA, F. Decomposição e Atividade Microbiana da Serapilheira em Coberturas Florestais no Sul do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, v.24, 2017;
- IVO, W. M. P. M.; SALCEDO, I. H. Soil CO₂ flux: a method comparison of closed static chambers in a sugarcane field. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 36, n. 2, p. 421-426, 2012.
- JENKINSON, D.S.; POWLSON, D.S.: The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: 5., a method for measuring soil biomass. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v.8, n.3, p.209-213, 1976.

KIZEKOVÁ, M.; HOPKINS, A.; KANIANSKA, R.; MAKOVNÍKOVÁ, J.; POLLÁK; PÁLKA, B. Changes in the area of permanent grassland and its implications for the provision of bioenergy: Slovakia as a case study. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 1, p. 218–232, 2018.

KRUTZMANN, A.; CECATO, U.; SILVA, P. A.; TORMENA, C. A.; IWAMOTO, B. S.; MARTINS, E. N. Palhadas de gramíneas tropicais e rendimento da soja no sistema de integração lavoura-pecuária. **Bioscience Journal**, v.29, n.4, p.842-851, 2013.

LIMA, A.G. **Caracterização de pastagens de *Brachiaria* sp. em relevo movimentado**. 2007, 44 p. il. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2007.

MACIEL, S.; ALMEIDA, H.; JÚNIOR, D. S.; CARDOSO, E. O.; et al. Avaliação de pastagem com animais: do tradicional ao moderno. **Revista eletrônica nutritime**, V. 11, N. 05, p. 3700-3713, 2014.

MARTUSCELLO, J. A.; JANK, L.; MARQUES, M.; NETO, G.; LAURA, A.; NORONHA, D.; VIEIRA, F. Produção de gramíneas do gênero *Brachiaria* sob níveis de sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.7, p.183-1190, 2009.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analítica Chimica Acta**, Oxford, v.27, p.31-36, 1962.

REBEQUI, A.M. **Dinâmica da água, do carbono e da produtividade em encosta sob pastagem**. 2015, 54 p. Il. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2015.

RODRIGUES, R. C. **Métodos de Análises Bromatológicas de Alimentos: Métodos Físicos, Químicos e Bromatológicos**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. 177p.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H. Decomposição de palha marcada e incorporação de 14-C a biomassa microbiana de um Latossolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 29-32, 1982.

SANTOS, A.C.; SALCEDO, I.H; CANDEIAS, A.L.B. Relação entre o relevo e as classes texturais do solo na microbacia hidrográfica de Vaca Brava, PB. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.54, p.86-94, 2002.

SANTOS, E. D. G.; PAULINO, M. F.; QUEIROZ, D. S.; FONSECA, D. M.; VALADARES FILHO, S. C.; LANA, R. P. Avaliação de pastagem diferida de *Brachiaria decumbens* Stapf. 2. disponibilidade de forragem e desempenho animal durante a seca. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.1, p.214-224, 2004.

SILVA, A. J.; CUNHA, F. F.; ROQUE, C. G.; SILVA, M. D. T.; RIBEIRO, D. O.; CARBALLAL, M. R. Replacement of liming and NPK fertilization with Turkey litter in degraded areas grown with *Urochloa decumbens*. **Semina: Ciencias Agrarias**, v. 39, n. 2, p. 467–475, 2018.

SILVA, H. F.; BARRETO, P. A. B.; SOUSA, G. T. DE O.; AZEVEDO, G. B. DE; GAMA-RODRIGUES, E. F. DA; OLIVEIRA, F. G. R. B. Decomposição de serapilheira

foliar em três sistemas florestais no Sudoeste da Bahia. **Revista brasileira de biociências**, v. 12, n. 3, p. 164–172, 2014.

SILVA, M. D. C. U.; SANTOS, M. V. F. D. U.; DUBEUX JR, J. C. B. U.; LIRA, M. D. A. I.; MELO, W. S. D. U.; OLIVEIRA, T. N. D. U.; ARAÚJO, G. G. L. D. Avaliação de Métodos para recuperação de Pastagens de Braquiária no Agreste de Pernambuco. 2. Valor Nutritivo da Forragem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.6, p.2007-2016, 2004.

SNYDER, J.D.; TROFYMOW, J.A. A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil samples. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 15:587-597, 1984.

SOUZA, F. M.; LEMOS, B. J. M.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; MAGNABOSCO, C. U.; CASTRO, L. M.; LOPES, F. B.; BRUNES, L. C. Introdução de leguminosas forrageiras, calagem e fosfatagem em pastagem degradada de Brachiaria brizantha. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.17, n.3, p.355-364, 2016.

SUN, S.; LEI, H.; CHANG, S.X. Drought differentially affects autotrophic and heterotrophic soil respiration rates and their temperature sensitivity. **Biology and Fertility of Soils**, v.55, p.275-283, 2019.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e ampl.; Brasília: **Embrapa Solos**, 573p, 2017.

THOMAS, R. L.; SHEARRD, R.W; MOYER, J. R. Comparison of conventional and automated procedures for N, P and K analysis of plant material using a single digestion. **Agronomy Journal**, Madison, 5:240-243, 1967.

THOMAS, R. J.; ASAKAWA, N. M. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. **Soil Biology and Biochemistry**, v.25, n10, p.1351-1361, 1993.

TIAN, L.; ZHAO, L.; WU, X; FANG, H.; ZHAO, Y.; et al. Soil moisture and texture primarily control the soil nutrient stoichiometry across the Tibetan grassland. **Science of the Total Environment**, v.622–623, p.192–202, 2018.

WU, X.; ZHAO, L.; FANG, H.; ZHAO, Y.; SMOAK, J. M.; PANG, Q.; DING, Y. Environmental controls on soil organic carbon and nitrogen stocks in the high-altitude arid western Qinghai-Tibetan Plateau permafrost region. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences** v.121, 2016.

VALADARES FILHO, S.C.; et al. CQBAL 3.0. Tabelas Brasileiras de Composição de Alimentos para Bovinos. Disponível em: <www.ufv.br/cqbal>. Acesso em Março de 2019.

XAVIER, D.F.; LÉDO, F.J.S.; PACIULLO, D.S.C.; PIRES, M.F.Á.; BODDEY, R.M. Dinâmica da serapilheira em pastagens de braquiária em sistema silvipastoril e monocultura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1214-1219, 2011.

XU, B.; XU, W.; WANG, Z.; CHEN, Z.; PALTA, J. A.; CHEN, Y. Accumulation of N and P in the Legume *Lespedeza davurica* in Controlled Mixtures with the Grass *Bothriochloa ischaemum* under Varying Water and Fertilization Conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1–12, 2018.

ZAGATO, L. Q. S. D.; ARAUJO, L. C.; SANTOS-ARAÚJO, S. N.; LUDKIEWICZ, M. G. Z.; JÚNIOR, O. S.; SANTOS, A. C. Decomposition of straw resulting from different strategies of recovery of degraded pastures using an integrated crop-livestock system. **Semina: Ciências Agrárias**, v.39, n.4, p.1397-1406, 2018.

ZHENG, Y.; LI, F.; HAO, L.; SHEDAYI, A. A.; GUO, L.; MA, C.; HUANG, B.; XU, M. The optimal CO₂ concentrations for the growth of three perennial grass species. **BMC Plant Biology**, v. 18, n. 1, p. 1–12, 2018.

PESSOA, Tiago de Carvalho. **Dinâmica da água e qualidade de pastagens no efluxo de CO₂ em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2019.

4. CAPÍTULO III: Produção e qualidade de pastagens com diferentes idades de estabelecimento em encostas de Argissolo Vermelho Amarelo

4.1. RESUMO

A capacidade produtiva das pastagens está relacionada à sua idade de estabelecimento e as propriedades do solo. Os solos destinados às pastagens, no Nordeste brasileiro, são geralmente em áreas de encostas. A inclinação das encostas favorece a erosão hídrica, que modifica as propriedades físicas e químicas do solo para uma condição inadequada à agropecuária. Com esse trabalho objetivou-se determinar as diferenças no efluxo de CO₂ do solo, na produção de forragem e na qualidade das pastagens com distintos tempos de uso, estabelecidas em duas encostas de Argissolo Vermelho Amarelo. O trabalho foi realizado na microbacia hidrográfica de Vaca Brava, Areia-PB. Avaliou-se, mensalmente, o efluxo de CO₂ do solo, a umidade do solo e a produção da forragem; sendo o efluxo em câmaras estáticas, a umidade por reflectometria no domínio da frequência (FDR), e a produção em gaiolas de exclusão, em duas encostas sob pastagem (uma com 22 anos-E22 e uma com 2 anos de uso-E2) e três posições do relevo (ombro, meia encosta e pedimento). Na forragem também foram avaliados os teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K); além da sua qualidade. No solo também foram feitas a caracterização física e química. As análises de componentes principais resultaram que independentemente da idade de uso da pastagem sobre a encosta, a maior produção foi no pedimento e a menor na meia encosta. Também no pedimento estão os maiores conteúdos de P e K no solo. A análise de correlação dos nutrientes extraídos pela planta demonstrou que P é o nutriente que limita a produção da pastagem nas condições avaliadas. A produção de pasto não seguiu a mesma tendência da umidade do solo, a umidade do solo foi maior na E22, enquanto a produção de pasto foi maior na E2. A redução do tempo de uso da pastagem aumentou a eficiência desse ecossistema, com redução na emissão de CO₂, melhora na qualidade do pasto e aumento na produção. Tais resultados demonstraram que do ponto de vista ambiental e econômico, a recuperação de pastagens, é uma prática eficiente.

Palavras-chave: Fertilidade do solo; Topossequência; Efluxo de CO₂;

PESSOA, Tiago de Carvalho. **Water dynamics and grassland quality in the efflux of CO₂ on hillslopes of Yellow Red Ultisol**. 2019. Thesis (Doctorate in Soil Science) - Post Graduate Program in Soil Science, Federal University of Paraiba, Areia, 2019.

Production and quality of pastures with different ages of establishment in hillslope of Yellow Red Ultisol

4.2. ABSTRACT

The productive capacity of grassland is related to their establishment age and soil properties. The soils destined to the grassland, Northeast of Brazilian, are usually in hillslope areas. The inclination of the slopes favors water erosion, which modifies the physical and chemical properties of the soil to an unsuitable condition for farming. Therefore, with this work we aim to determine the differences in forage yield and quality of pastures with different ages, established in two hillslope of Yellow Red Ultisol. The work was developed in the Vaca Brava watershed, Areia-PB. The soil CO₂ efflux, soil moisture and forage yield were evaluated monthly; efflux in static chambers, frequency domain reflectometry humidity (FDR), and exclusion cage production on two pastures hillslope (one 22 year-E22 and one of 2 year-E2 of use) and three relief positions (shoulder, backslopes and footslope). In the forage were also evaluated the contents of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K); beyond its quality. In soil were also made the physical and chemical characterization. The analyzes of main components showed that regardless of the age of pasture use on the hillslope, the highest yield was in the footslope and the lowest in the backslopes. Also in the footslope are the highest contents of P and K in the soil. The correlation analysis of the nutrients extracted by the plant showed that P is the nutrient that limits pasture production under the evaluated conditions. Production pasture not follow the same trend of soil moisture, soil moisture was higher at E22, while yield was higher at E2. Reducing pasture use has increased the efficiency of this ecosystem, with reduced CO₂ emissions, improved pasture quality and increased production. These results demonstrated that from an environmental and economic point of view, pasture recovery is an efficient practice.

Keywords: Soil fertility; Landscape; Efflux of CO₂;

4.3. INTRODUÇÃO

O Brasil possui aproximadamente 180 milhões de hectares de pastagens (MARTUSCELLO et al., 2009), com 80% a 90% dessas áreas compostas por gramíneas do gênero *Urochloa* (SOUZA et al., 2016) e 50% desse gênero constituído pela espécie *Urochloa decumbens* (MOTTA et al., 2017). As pastagens são a principal fonte de alimentos para bovinos no Brasil, sendo a forma mais prática e econômica para os pecuaristas (SOUZA et al., 2016).

Entretanto, a maioria das áreas destinadas às pastagens é de baixa fertilidade, influenciando nos teores de fósforo (P), nitrogênio (N) e potássio (K) absorvidos pela planta e consequentemente na produtividade. K é o segundo nutriente mais abundante no tecido das plantas, após o N, com papel fundamental na eficiência e economia do uso da água pelas mesmas. Sendo tão limitante quanto N e P para produtividade vegetal em ecossistemas terrestres (SARDANS e PEÑUELAS, 2015), entre eles as pastagens.

Em solos de baixa fertilidade, ou onde não há adubação, é importante o crescimento do sistema radicular para aquisição de água e nutrientes, pois melhora a eficiência da absorção de N e P quando os nutrientes do solo são pouco disponíveis (ISAAC et al., 2012), essa eficiência de absorção é influenciada pela idade do pasto. Os teores de P absorvidos pela *Urochloa decumbens* é maior na pastagem mais jovem, quando as concentrações de P no solo são semelhantes (MOTTA et al., 2017).

A disponibilidade de matéria seca de forragem é influenciada principalmente pela idade da reforma das pastagens, Santos et al. (2007) verificaram que a pastagem mais nova (um ano) apresentou uma taxa de produtividade 197% superior, em relação à pastagem com vinte anos. Essa menor produção na pastagem com vinte anos, provavelmente foi em razão do manejo intensivo e do sobrepastoreio.

O uso intensivo das pastagens por longo tempo, sem a reposição de nutrientes e sem a recuperação da capacidade produtiva do pasto, através da renovação da pastagem, levam-a a um estado de degradação pela diminuição na produtividade da cultura (BACKES et al., 2017; SILVA, A.J. et al., 2018). Porém, pequenas estratégias de manejo como a recuperação e uma simples correção do solo (SILVA et al., 2015) com calcário, pode aumentar a estabilidade da cultura e manter alta produção de matéria seca nas pastagens (SILVA, A.J. et al., 2018).

As pastagens também fornecem serviços ecossistêmicos, tais como, a cobertura do solo e a infiltração de água, além de serem importantes no armazenamento de carbono e na mitigação das emissões de CO₂ (KIZEKOVÁ et al., 2017).

A resposta das pastagens à mudança climática desempenha um papel fundamental no equilíbrio do carbono (C) terrestre (ZHENG et al., 2018). Mei et al. (2018) comparando encostas com usos do solo sob vegetação florestal e sob pastagem, obtiveram no uso com pastagem os maiores valores de carbono orgânico. Os ciclos de C, N, P e K estão intimamente ligados através da decomposição da matéria orgânica do solo e da respiração do ecossistema (MOOSHAMMER et al., 2017), com consequente emissão de CO₂.

Outros fatores que influenciam na produção e na absorção de nutrientes são a umidade, o relevo e a textura do solo (WU et al., 2016; TIAN et al., 2017). Os teores de C, N, P e K do solo, podem limitar a produtividade em pastagens de topossequências, pois um fator que tem grande importância na relação dos nutrientes do solo e os absorvidos pela planta é a topografia (SILVA, A.P. et al., 2018). Por isso, a variação na produtividade de pastagens em diferentes encostas foi explicada em sua maioria pelos teores de argila e Silte (32,5%) (TIAN et al., 2018).

Diante do exposto, em solos sem reposição dos nutrientes extraídos e exportados pelas pastagens, a idade da pastagem tem maior influência no efluxo de CO₂ do solo e na produção e qualidade da forragem, do que o conteúdo de água do solo e a posição na encosta, quando a fertilidade for igualmente limitante. Assim, objetivou-se identificar as diferenças na produção de forragem e na absorção de nutrientes em pastagens com idades distintas, em duas encostas de Argissolo Vermelho Amarelo.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1. Área de estudo

A pesquisa foi realizada em áreas de encostas pertencentes à Fazenda Riachão, situada à margem da rodovia PB 079 entre os municípios de Areia (PB) e Remígio (PB). A mesma está inserida na microbacia hidrográfica Vaca-Brava, localizada na microrregião do Brejo paraibano, Nordeste do Brasil, compreendida entre as coordenadas geográficas: 06°57'48" e 06°59'43" de latitude S e 35°44'03" e 35°45'59" de longitude O) (LIMA et al., 2015).

Possui dois tipos de uso do solo predominante, uma área de reserva ecológica e outra de agropecuária familiar. Na área usada pela agricultura familiar, a pastagem é o tipo de uso com maior área de abrangência, em função da pecuária ser a principal atividade econômica desta região (GALVÃO, SALCEDO e SANTOS, 2005), onde a criação de animais é extensiva.

Predomina o clima do tipo As', caracterizado como quente e úmido, com chuvas de outono e inverno, pluviosidade anual variando entre 900 e 1.400 mm e estação seca podendo atingir entre cinco e seis meses (ALVARES et al., 2013). Temperaturas médias anuais de 24°C (GALVÃO, SALCEDO e SANTOS, 2005). A microbacia possui uma altitude média de 637 m, com o relevo apresentando variações entre ondulado a fortemente ondulado, e em algumas áreas, relevo menos declivoso.

4.4.2. Classificação e divisão das encostas

As distintas formas da encosta possuem a mesma classe de solo (Argissolo Vermelho Amarelo), gênero e espécie de gramínea formadora do pasto, presença de pastejo por bovinos, mas distintas idades e áreas de cultivo. As encostas foram divididas conforme suas características e idade de pastejo em encosta 2 e 22.

A encosta 22, com pastagem estabilizada, (localizada a 6°57'55,9" de latitude S e 35°46'14,4" de longitude O), apresenta forma convexa inserida numa área de 13 ha, foi constituída de pastagem de *Urochloa decumbens* estabelecida há cerca de 22 anos, após escarificação para descompactação do solo, seguida de uma aração para desfragmentação da estrutura, não havendo semeadura de novas sementes, o estabelecimento da pastagem foi oriundo da germinação das sementes presentes no pasto incorporado ao solo.

A encosta 2, com pastagem recuperada, (localizada a 6°58'02,4" de latitude S e 35°46'11,7" de longitude O) apresenta forma convexa e está inserida em uma área de 8 ha. Esteve sob pastagem de *Urochloa decumbens* por 20 anos, mas devido à predominância da espécie invasora capim Lucas (*Sporobolus indicus*. L.), foi efetuada três gradagens na área, para morte da vegetação e desfragmentação do solo, com posterior calagem (aplicação de 1313 kg ha⁻¹ de calcário calcítico) a lanço em área total, para elevação da saturação por bases a 70%, e a semeadura mecânica das sementes de *Urochloa decumbens*, cultivar Basilisk. Atualmente essa pastagem está no seu segundo ano de uso, após o replantio.

As variadas formas das topossequências resultam em diferentes declividades ao longo da paisagem do relevo, portanto Santos, Salcedo e Candeias (2002) dividiram as topossequências nas seguintes posições: topo, ombro, meia encosta, pedimento e várzea, sendo a encosta composta pelas posições do ombro, meia encosta e pedimento (Figura 1). No presente trabalho as encostas foram o objeto de estudo. Na tabela 1, estão as informações resumidas da pastagem e do relevo das encostas.

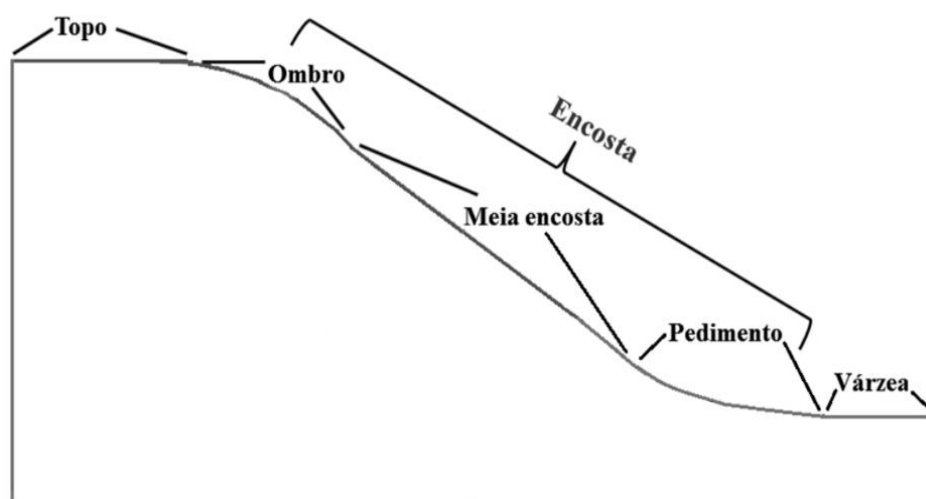


Figura 1. Posições do relevo na topossequência por Santos, Salcedo e Candeias (2002).

Tabela 1. Características da pastagem e do relevo na encosta 2 (E2) e encosta 22 (E22).

Características		E22	E2
Tempo de implantação da pastagem		22 anos	2 anos
Área de pastejo (ha)		13	8
¹ Lotação animal (UA ha ⁻¹)		2,21	3,59
Forma de exploração		Baixa tecnologia	Baixa tecnologia
Manutenção		Arranquio de invasoras	Arranquio de invasoras
Forma de exploração		Consumo total do pasto	Consumo total do pasto
Pousio		Para rebrota do pasto	Para rebrota do pasto
Forma da encosta		Convexa	Convexa
Comprimento de rampa		60 m	52 m
Ombro		16	18
² Declividade das posições (%)	Meia encosta	21	19
	Pedimento	16	16

¹UA= Unidade animal; ²Ombro e Meia encosta= 16 m de comprimento de rampa, ambos; Pedimento= 12 m de comprimento de rampa.

4.4.3. Quantificação da precipitação pluvial e umidade do solo

A precipitação pluvial (Figura 2) foi monitorada durante o ano da pesquisa (2017), em uma estação meteorológica automatizada, na área de estudo. Vale salientar que o período experimental compreende os meses de janeiro a outubro do ano de 2017.

A umidade volumétrica do solo, durante os meses de avaliação, foi determinada na camada de 0-20 cm, nas três posições do relevo, no sentido do declive das duas encostas. Para isso, utilizou-se uma sonda de capacitância (modelo *Diviner* 2000); que ao

ser inserida em um tubo de acesso no solo, provê automaticamente leituras do conteúdo da água, em frequência dielétrica, a cada 10 cm de profundidade. Esse valor, em frequência da água, foi transformado em umidade volumétrica, através do uso de curvas de calibração (REBEQUI, 2015). As leituras foram realizadas em três repetições por posição.

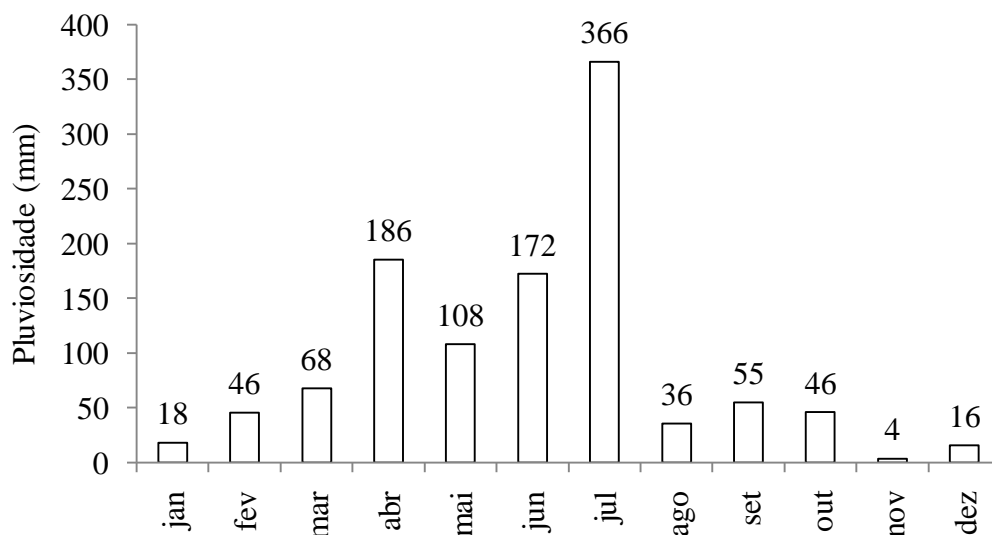


Figura 2. Pluviosidade mensal no ano de 2017, na área experimental da microbacia hidrográfica de Vaca Brava-PB.

É importante observar que nos meses de abril a julho de 2017, precipitou 832 mm de chuva, enquanto 289 mm no acumulado dos demais meses do ano.

4.4.4. Caracterização física e química do solo

Foram coletadas amostras de solo, deformadas, nas três posições das duas encostas, aos 0-20 cm de profundidade (onde ocorre a maior concentração do sistema radicular da *Urochloa*), secas ao ar e tamisadas em peneira de 2 mm, para caracterização física: granulometria, porosidade total, densidade de partículas, argila dispersa em água (TEIXEIRA et al., 2017). Química: pH, bases trocáveis, acidez trocável, fósforo e potássio extraíveis por Mehlich-1 (TEIXEIRA et al., 2017); além de Carbono Orgânico Total (COT) (SNYDER e TROFYMOW, 1984). Também foram coletadas amostras de solo indeformadas, para a determinação da densidade do solo.

4.4.5. Produção de forragem

A produção e o conteúdo de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) na matéria seca do pasto foram avaliados mensalmente, em duas encostas sob pastagens (uma com 2 anos e uma com 22 anos de uso) três posições do relevo (ombro, meia encosta e pedimento) e 10 meses de avaliação (janeiro-outubro de 2017).

Para isso, utilizaram-se gaiolas de exclusão que tem por finalidade evitar o consumo da planta forrageira pelos animais, permitindo assim, estimar a produção de pasto em sistemas de pastejo (MACIEL et al., 2014). Com esse fim, foram fabricadas gaiolas de exclusão com área de 0,160 m², com barras de ferro 3/4 nas dimensões de 0,40 m de comprimento, 0,40 m de largura e 0,60 m de altura (sendo 0,20 m da altura destinada para fixação) e revestidas com tela de arame galvanizado número 18, com auxílio de alicate e arame liso.

O pasto dentro da gaiola de exclusão foi cortado na mesma altura do pasto de fora das gaiolas (consumidos pelos animais) representando a altura de pastejo dos animais, com uso de tesouras, a cada 30 dias. Após cada corte mudou-se as gaiolas de lugar, sempre obedecendo à declividade de cada posição na encosta, enquanto, o pasto coletado foi armazenado em sacos de papel previamente identificados, secos em estufa a 65°C até peso constante, para determinação da matéria seca.

Em seguida foi moído e digerido com mistura de ácido sulfúrico (H₂SO₄) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) (THOMAS et al., 1967) para análises dos teores de P por colorimetria (MURPHY e RYLEY, 1962) e K por fotômetro de chama, ambos extraíveis por Mehlich-1 (TEIXEIRA et al., 2017); além de N total pelo método de Kjeldahl (BREMNER e MULVANEY, 1982).

4.4.6. Análises bromatológicas

Na matéria seca da forragem foram feitas análises bromatológicas determinando o nitrogênio total pelo método micro Kjeldahl, sendo, posteriormente, multiplicado pelo fator 6,25 para obtenção da proteína bruta (Pb), segundo AOAC (1984); Carbono total (C) (SNYDER e TROFYMOW, 1984), fibra em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA) conforme Rodrigues (2010). Levando em consideração a estação do ano, tendo como caracterizador a quantidade de chuva, estação seca (precipitações menores que 53 mm), estação chuvosa (precipitações acima de 144 mm).

4.4.7. Efluxo de C-CO₂

O efluxo de CO₂ (dióxido de carbono) do solo, foi avaliado mensalmente, nas duas encostas sob pastagens (uma com 2 anos e uma com 22 anos de uso), três posições do relevo (ombro, meia encosta e pedimento) e em dez períodos de avaliações. As avaliações foram realizadas nos meses de fevereiro-outubro de 2017.

O CO₂ de origem autotrófica e heterotrófica foi capturado na superfície do solo, usando a metodologia de Jenkinson e Powlson (1976) adaptada por Ivo e Salcedo (2012).

Este método consiste na captura do CO_2 dentro de câmaras estáticas, por 40 mL de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1 Mol L^{-1} contidos em um recipiente, durante 24 horas. As câmaras estáticas consistiam de um recipiente cilíndrico (com diâmetro de 22,3 cm e altura de 8 cm) ocupando uma área de $0,0391 \text{ m}^2$, com suas bordas voltadas ao solo, para proteger o recipiente interno, o qual continha o NaOH e possuía área de $0,0154 \text{ m}^2$.

O efluxo de CO_2 no campo consistiu dos seguintes passos: 1) Cortou-se a parte aérea das plantas no local, com auxílio de tesoura; 2) Colocou-se o recipiente com a solução sobre o solo; 3) Cobriu-se o recipiente com a câmara estática; 4) Cobriram-se totalmente as bordas da câmara, para evitar o fluxo de CO_2 da câmara para atmosfera. No tratamento controle (branco) o recipiente ficou tampado e protegido durante as 24 h em um saco plástico fechado, no entanto, o recipiente ficou exposto ao ar atmosférico pelo mesmo período dos demais tratamentos durante a colocação (≈ 5 segundos) e retirada (≈ 5 segundos) do recipiente, para retirar a contaminação com CO_2 atmosférico que ocorria durante esses procedimentos.

Completadas as 24 h, os recipientes foram retirados, tampados, identificados, armazenados e transportados até o laboratório, onde a solução de NaOH foi transferida para recipientes fechados e armazenados em refrigeração. O teor de CO_2 foi determinado por titulação Potenciométrica com ácido clorídrico (HCl) a 0,05 N (SAMPAIO e SALCEDO, 1982).

4.4.8. Análise estatística

Na análise estatística dos dados, em virtude do grande número de variáveis e fatores (conjunto original) a serem explicadas, empregou-se a técnica da análise multivariada de componentes principais (ACP), para reduzir esse número de variáveis que se correlacionam, em agrupamento de dados similares, com perda mínima de informações.

Anteriormente à análise multivariada dos dados, estes foram padronizados (média/desvio-padrão), para assegurar que todas as variáveis contribuíssem igualmente para o modelo independentemente da escala pela qual elas foram medidas.

A matriz de correlação dos dados foi normalizada para 100%. O critério de decisão adotado para definir o número de componentes principais, a serem usados para interpretação dos resultados, foi o da escolha de tantos componentes possíveis até que fosse obtido em torno de 70% da explicação da variância dos dados. Os procedimentos estatísticos multivariados foram realizados utilizando-se o software estatístico R.

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1. Análise física do solo

As variáveis de caracterização física do solo analisadas: Areia total (AT), Silte e Porosidade total (PT) correlacionaram-se positivamente com o componente 1 (CP1), enquanto Argila (Arg) e Densidade do solo (Ds) correlacionaram-se negativamente com o CP1 (Tabela 2). Já as variáveis Argilla dispersa em água (ADA) e Densidade de partículas (Dp) correlacionaram-se positivamente com o componente 2 (CP2).

Os dois CPs foram responsáveis por mais de 94% da variação total (Tabela 2) sobre as características físicas do solo, nas três posições do relevo de encostas sob pastagem com 2 (E2) e com 22 anos (E22) de uso, aonde o CP1 foi responsável por 63% e o CP2 por 31,6% da variância dos dados. Indicando que as 7 variáveis estudadas podem ser substituídas por estes dois componentes.

Tabela 2. Matriz de correlação da caracterização física de um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-20 cm, de duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades.

Autovalores	Componente principal 1 (CP1)	Componente principal 2 (CP2)
Variância	4,41	2,21
Variância (%)	63,00	31,63
Variância acumulada (%)	63,00	94,63
Variáveis	CP1	CP2
AT	0,78	-0,54
Silte	0,92	0,05
Arg	-0,92	0,38
ADA	-0,34	0,90
Ds	-0,97	-0,26
Dp	0,47	0,85
PT	0,91	0,42

AT = Areia total; Arg= Argila; ADA = Argila dispersa em água; Ds = Densidade do solo; Dp= densidade de partícula; PT = Porosidade total.

Pela proximidade do vetor em relação ao eixo do CP1, nota-se que Silte foi a variável que mais contribuiu para o CP1, sendo a mais importante entre elas (Figura 3). Entre essas variáveis nota-se o agrupamento de AT, Silte e PT em contraposição ao grupo Arg e Ds. O que é compreensível afinal granulometricamente AT e Arg são inversamente proporcionais, entretanto, chama a atenção à relação negativa entre Silte e Argila, indicando que com o aumento de argila há um decréscimo na quantidade de Silte presente no solo. Logo, Silte tem relação com areia, mas não tem com argila, nas condições avaliadas.

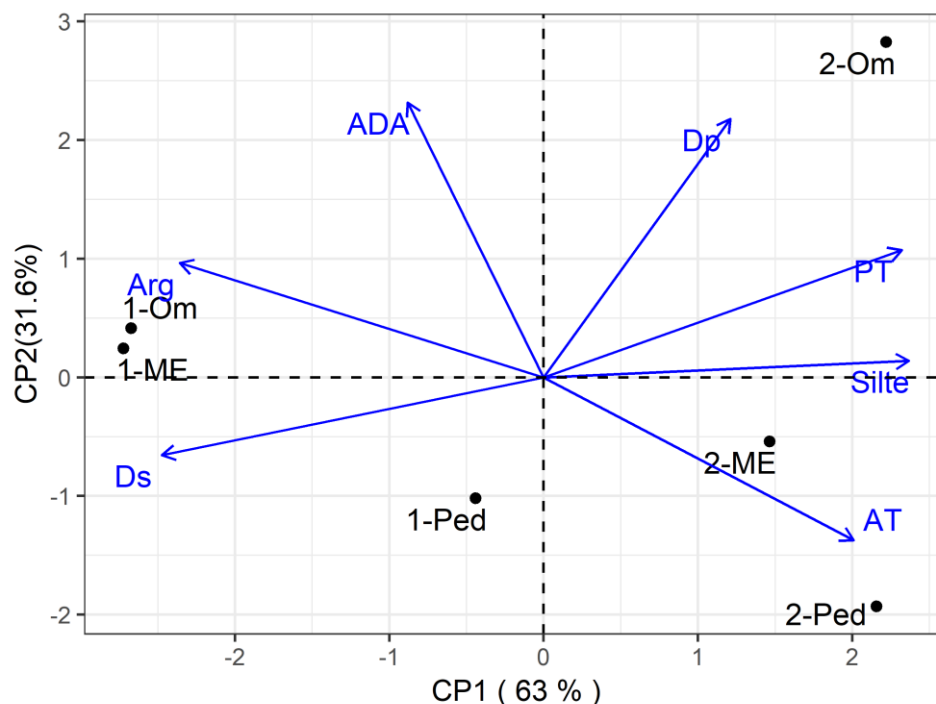


Figura 3. Análise de componentes principais da caracterização física de um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-20 cm, em duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades. Om: ombro; ME: meia encosta; Ped: pedimento; N° 1= Encosta sob pastagem de 22 anos (E22); N° 2= Encosta sob pastagem de 2 anos (E2); AT = Areia total; Arg= Argila; ADA = Argila dispersa em água; Ds = Densidade do solo; Dp= densidade de partícula; PT = Porosidade total.

A gradagem feita recentemente na E2 (sob pastagem de dois anos de uso) influenciou significativamente nos teores de Silte em toda a encosta, o que pode ser verificado pela posição do vetor de Silte na Figura 3, que está indicando correlação com todas as posições da E2. Comprovando os maiores teores de Silte na E2, em relação a E22. Como a E2 é mais arenosa que a E22, essa tendência de Silte com areia refletiu de forma global quando as variáveis são resumidas no CP1.

Pela Figura 3 é possível notar que a AT está mais concentrada no pedimento, nas duas encostas, que é a posição de deposição nessas áreas em razão dos efeitos erosivos, porém devido aos efeitos da alteração e revolvimento do solo pela gradagem na E2, há também uma grande concentração de areia na meia encosta E2. As posições da E22 e da E2 formaram um agrupamento distinto na ACP (Figura 3), com uma diferença muito maior nas posições do ombro e meia encosta da E22, que estão associadas com os teores de Arg. A posição do pedimento E22 está mais associada com meia encosta e pedimento E2, devido aos altos teores de AT entre elas.

A variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta avaliada por Lima et al. (2015), indica que a infiltração e a distribuição das frações granulométricas

são diretamente influenciadas pelo relevo da encosta. Caso as encostas sejam revolvidas, essa variabilidade espacial será muito mais expressiva devido aos efeitos erosivos, e a enxurrada no solo desagregado e descoberto.

Além disso, a forma da encosta (SILVA et al., 2018) tem influência na caracterização física, entretanto, as duas encostas que avaliamos tem a mesma forma (convexa) o que indica que a variabilidade física entre as áreas, está associado, principalmente, ao revolvimento e tempo de uso do solo, afinal a E22 tem pastagem há 22 anos, e a E2 a apenas 2 anos.

4.5.2. Análise química da fertilidade do solo

O componente 1 (CP1) correlacionou-se positivamente com: pH, Fósforo (P), Potássio (K), Sódio (Na) e negativamente com Magnésio (Mg), Acidez potencial (H+Al) e Alumínio (Al). O CP2 teve correlação forte positiva com Ca e matéria orgânica (MOS) representada pelos teores de COT.

Esses CPs foram responsáveis por 80,3% da variação total (Tabela 3) sobre as características químicas do solo nas três posições do relevo das duas encostas sob pastagem, uma com 22 (E22) e outra com 2 (E2) anos de uso, em que o CP1 foi responsável por 59,1% e o CP2 por 21,2% da variância dos dados. Isto indica que os dois CPs substituem as 9 variáveis estudadas, com perda mínima de informações.

Tabela 3. Matriz de correlação da caracterização química de um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-20 cm, de duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades.

Autovalores	Componente principal 1 (CP1)	Componente principal 2 (CP2)
Variância	5,32	1,90
Variância (%)	59,1	21,2
Variância acumulada (%)	59,1	80,3
Variáveis	CP1	CP2
pH ¹	0,96	0,24
P	0,92	0,34
K	0,68	-0,11
Na	0,77	0,28
Ca	0,09	0,88
Mg	-0,74	0,07
H+Al	-0,92	0,35
Al	-0,94	0,00
COT	-0,44	0,86

¹ pH determinado em água (1:2,5); P= Fósforo; K= Potássio; Na= Sódio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio; H+Al= Hidrogênio+Alumínio (acidez potencial); Al= Alumínio; COT= Carbono orgânico total.

O Ca está mais concentrado na posição do ombro E22, e no pedimento da E2, e a MOS está mais concentrada no ombro e meia encosta E22 (Figura 4). A correlação

positiva entre MOS e Ca no CP2, indica que o aumento nos teores de MOS tem influência positiva no aumento da concentração de Ca.

Observou-se a formação de dois grupos de variáveis (Figura 4), um grupo com H+Al, Al e Mg. Esse grupo contrasta com o grupo formado por P, K, pH e Na, com correlação negativa entre os grupos.

Apesar da Figura 4, apresentar correlação entre a acidez potencial (H+Al), acidez trocável (Al) e Mg, ressalta-se que os valores de Mg e Ca são classificados como baixo e H+Al como alto (ALVAREZ-VENEGAS et al., 1999); como pode ser verificado na tabela 4. Essa correlação entre esses elementos pode ser explicada pela capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, pois se correlacionaram com as posições do relevo onde se encontram mais cargas elétricas disponíveis (Tabela 4).

Tabela 4. Caracterização química da fertilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade, em duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades.

Posição	pH ¹	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺	CTC	COT
		---mg kg ⁻¹ ---		-----		cmol _c kg ⁻¹ -----				g kg ⁻¹
Encosta sob pastagem com 22 anos (E22)										
Ombro	5,44	2,45	104	0,02	0,74	0,48	6,12	0,10	7,63	14,4
M. encosta	5,40	2,23	69,3	0,03	0,51	0,47	5,91	0,15	7,10	13,8
Pedimento	5,83	3,40	399	0,04	0,52	0,43	3,34	0,04	5,34	9,4
Encosta sob pastagem com 2 anos (E2)										
Ombro	5,45	2,62	74,2	0,01	0,55	0,35	5,06	0,10	6,16	12,0
M. encosta	5,43	1,99	78,2	0,02	0,49	0,33	3,72	0,09	4,76	7,9
Pedimento	6,42	4,80	198	0,04	0,65	0,17	2,45	0,02	3,82	11,4

⁽¹⁾ pH determinado em água (1:2,5); pH, Ca, Mg, H+Al, Al; Na, K e P (extraíveis por Mehlich-1), foram determinadas pela metodologia de Teixeira et al. (2017); COT (SNYDER e TROFYMOW, 1984); CTC (capacidade de troca de cátions) = S + (H+Al); S (soma de bases) = Σ(Ca, Mg, Na, K); K [cmol_c kg⁻¹].

Pela classificação de Alvarez-Venegas et al. (1999), os teores de Ca e Mg são baixos e os de Al muito baixo nas três posições, logo, Al não contribuiu muito para a acidez potencial (H+Al) que é alta (Tabela 4). O pH do solo indica acidez média, nas três posições da E22 e no ombro e meia encosta da E2, e indica acidez fraca no pedimento E2.

A acidez do solo foi maior no ombro e meia encosta da E2 e da E22 (Figura 4), posições mais altas do relevo e mais sujeitas a erosão hídrica e lixiviação de íons, no entanto, elementos de alta capacidade de se ligarem às cargas elétricas do solo, por sua alta valência (Al³⁺) estão mais concentrados nessas posições. Já os teores de P, Na, pH e K foram maiores no pedimento independentemente da idade da pastagem, o que comprova o pedimento como área de deposição, afinal K⁺ e Na⁺ são elementos que ficam fracamente retidos no solo e são facilmente carregados das posições superiores para o pedimento.

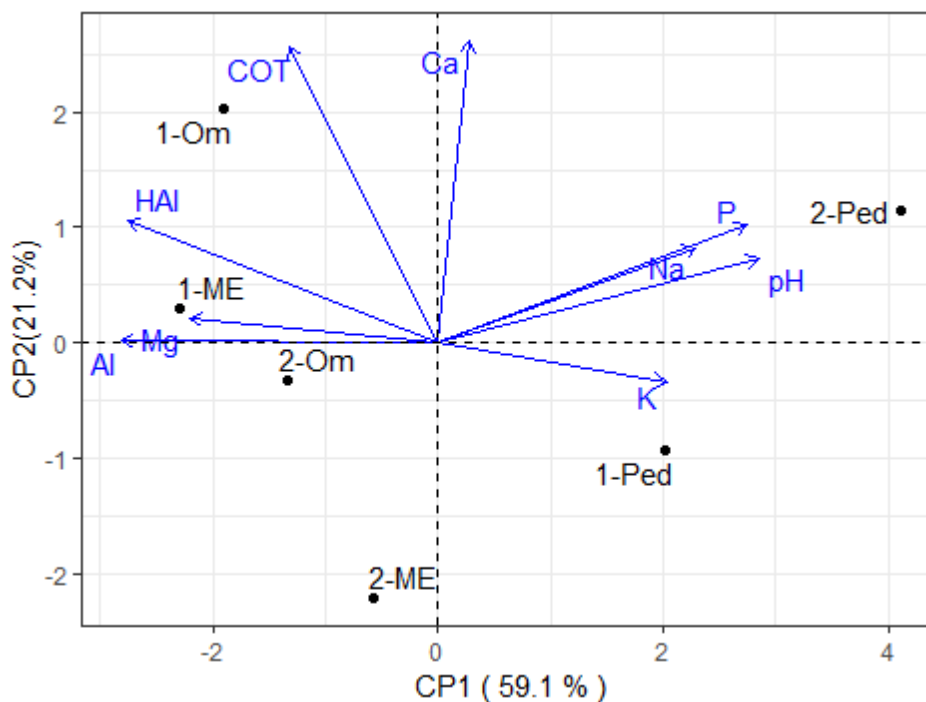


Figura 4. Análise de componentes principais da caracterização química de um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-20 cm, de duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades. Om: ombro, ME: meia encosta, Ped: pedimento; N° 1= Encosta sob pastagem de 22 anos (E22); N° 2= Encosta sob pastagem de 2 anos (E2); pH determinado em água (1:2,5); P= Fósforo; K= Potássio; Na= Sódio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio; H+Al (HAl)= Hidrogênio+Alumínio (acidez potencial); Al= Alumínio (acidez trocável); COT= Carbono orgânico total.

Nas duas encostas, mesmo com as distintas idades de uso do pasto, o fósforo (P) está sofrendo efeito da erosão hídrica das posições superiores, com consequente depósito no pedimento. Galvão, Salcedo e Oliveira (2008) observaram que a erosão hídrica tem efeito significativo no movimento de P, com migração vertical desse nutriente e potencial de perdas por drenagem. Logo, mediante os resultados obtidos pelos autores citados, e diante de nossos resultados, podemos inferir que em solos declivosos há movimento lateral de P, em decorrência da erosão, no sentido do declive com acúmulo no pedimento.

O relevo está influenciando nas características químicas do solo como observado por outros autores (WU et al., 2016; TIAN et al., 2017), isso ocorre porque as distintas posições apresentam teores variáveis de argila, e é justamente as menores partículas, como a argila, que explicam as maiores variações (TIAN et al., 2018). Alguns autores avaliando a influência da forma e posição da encosta nas características do solo observaram que as condições de relevo pouco influenciaram os atributos químicos do solo (SILVA, A.P. et al., 2018). Resultados que são muito contrastantes aos que observamos nesse trabalho, no

entanto, as coberturas vegetais são distintas, e no nosso caso, ainda há a presença do pastejo bovino.

4.5.3. Qualidade da pastagem em função das estações do ano

As variáveis Carbono (C), Nitrogênio (N) e Proteína bruta (Pb) estão correlacionadas positivamente com o CP1, esse correlacionou-se negativamente com a Fibra em detergente neutro (FDN), e com a Fibra em detergente ácido (FDA). O CP2 teve correlação positiva com FDN, FDA, N, Pb e negativa com C. Vale salientar que essa avaliação na tabela 5, homogeneiza as condições climáticas. No entanto, para o melhor entendimento da dinâmica da qualidade da pastagem em função da estação do ano, foi gerado o gráfico *biplot* (Figura 5).

Na tabela 5 observa-se que os dois CPs foram responsáveis por 88,6% da variância acumulada, em que o CP1 foi responsável por 51,65% e o CP2 por 36,96% da variância dos dados. Indicando que as 5 variáveis estudadas podem ser substituídas por estes dois componentes, com perda mínima de informação.

Tabela 5. Matriz de correlação da qualidade de *Urochloa decumbens* em pastagens com diferentes idades num Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento.

Autovalores	Componente principal 1 (CP1)	Componente principal 2 (CP2)
Variância	2,58	1,85
Variância (%)	51,65	36,96
Variância acumulada (%)	51,65	88,61
Variáveis	CP1	CP2
FDN	-0,80	0,35
FDA	-0,50	0,78
C	0,84	-0,37
N	0,75	0,66
Pb	0,66	0,74

FDN= fibra em detergente neutro; FDA= fibra em detergente ácido; C= carbono; N= nitrogênio; Pb= proteína bruta.

Dentro do CP1 houve correlação negativa de FDN e FDA com N, o que é normal, pois indica que com o aumento do N, há decréscimo de FDN e FDA que estão associados com a baixa qualidade da pastagem, tanto para alimentação animal (FDN) quanto para a geração de serrapilheira e consequente decomposição do resíduo (FDA) (Figura 5). Os maiores valores de FDA e FDN estão na encosta sob pastagem há 22 anos, na posição do pedimento (FDA) e da meia encosta (FDN), no período chuvoso.

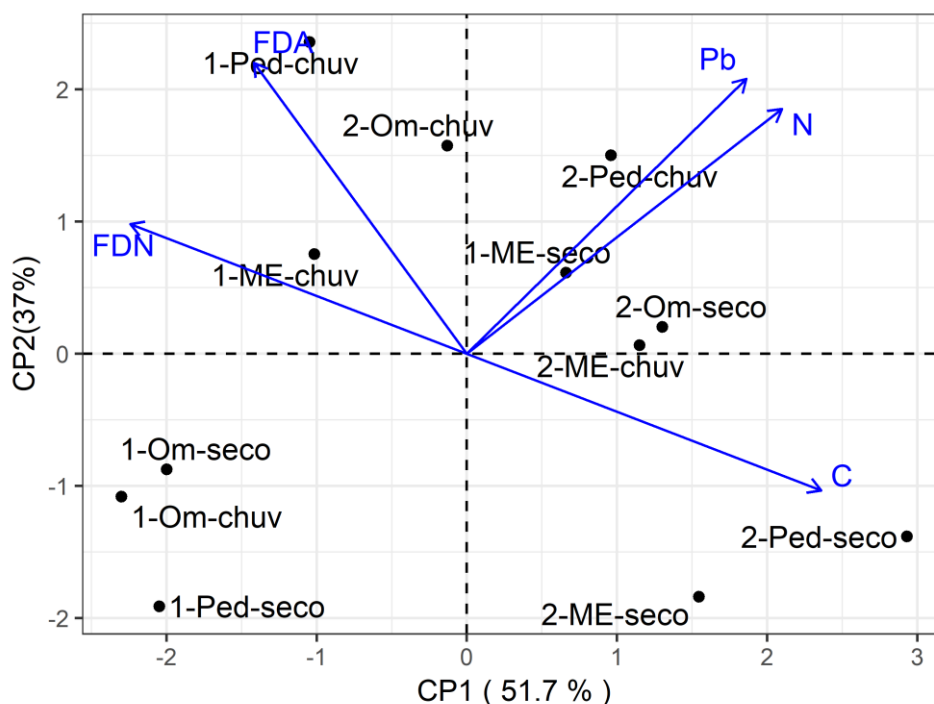


Figura 5. Análise de componentes principais da qualidade de *Urochloa decumbens* de um Argissolo Vermelho Amarelo aos 0-20 cm de profundidade em duas encostas, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em pastagens com diferentes idades. Om: ombro, ME: meia encosta, Ped: pedimento; Nº 1= Encosta sob pastagem de 22 anos (E22); Nº 2= Encosta sob pastagem de 2 anos (E2); seco= estação seca; chuv= estação chuvosa.

A FDN indica a quantidade total de fibra na pastagem, e está relacionado ao consumo, segundo Rodrigues (2010). Assim, quanto maior o nível de FDN, menor o consumo de matéria seca. Já a fibra em detergente ácido (FDA) mede os componentes mais indigestíveis da forragem: celulose e lignina (RODRIGUES, 2010). Nesse caso, quanto maiores os valores de FDA, menor será a capacidade de o pasto nutrir o animal.

Outra informação relevante no CP1 é que carbono correlacionou-se negativamente com FDA e FDN, e positivamente com N, embora uma correlação fraca entre nitrogênio e carbono pela posição das setas e angulação dos vetores como verificamos na Figura 5. Vale salientar que essa gramínea é rica em carbono, por isso a relação de carbono com nitrogênio, mesmo fraca, indica que a pastagem tem uma razoável qualidade.

O que torna o resultado mais satisfatório é o C estar associado com a variável de boa qualidade (N) e não com as variáveis de baixa qualidade FDN e FDA. E por isso os valores da relação C:N, nas duas pastagens, variaram entre 17:1 e 20:1. Valores que caracterizam uma boa relação entre esses dois nutrientes, para esse tipo de vegetação.

Na Figura 5 no CP2 a correlação entre N e FDA é muito fraca, quase nula, devido a angulação formada entre os dois vetores, o que é desejável afinal FDA é constituído por lignina e celulose, compostos com pouca relação com as proteínas.

Verificaram-se os maiores valores de carbono no pedimento E2 período seco (Figura 5), e os de nitrogênio também no pedimento E2, mas no período chuvoso. Esse comportamento indica melhor qualidade da forragem da pastagem de 2 anos (E2) em relação a de 22 anos (E22), porque embora predomine o carbono na estação seca, na estação chuvosa predomina nitrogênio, provavelmente em virtude da maior absorção de nitrogênio nesse período. Além disso, na Figura 5 notamos que há uma correlação, embora fraca, porém positiva, indicando que na E2 na posição do pedimento há maior produção de proteína que na E22.

FDA e Pb, bromatologicamente, são bastante contrastantes e indicam, respectivamente, pastagem de baixa e de boa qualidade, assim, o pedimento da pastagem renovada (2 anos de uso) (Figura 5) apresenta características de boa qualidade, pela localização e proximidade do vetor, e pelo mesmo motivo e de forma mais forte há indicação de forragem de menor qualidade no pedimento E22 (Figura 5), ambas no período chuvoso.

Esses resultados demonstram que a recuperação da pastagem, melhorou a qualidade na pastagem E2 (renovada) em relação a E22; comprovando que apenas o revolvimento do solo, com incorporação do resíduo vegetal e a calagem para aumento do pH, refletiu em benefício para toda a cadeia produtiva, e estão ligadas às características do solo.

Vale salientar que nas duas pastagens, a posição do pedimento é onde existem as melhores condições edáficas, e na estação chuvosa é onde ocorre a maior produção vegetal e a maior atividade biológica (efluxo de CO_2) como discutiremos mais a frente. Por isso, é a posição que melhor representa a qualidade das pastagens avaliadas.

Como pode ser verificado na Figura 5, há uma grande variabilidade entre posições, idades do pastejo na encosta e estação do ano. Indicando a dinâmica que existe nesse ecossistema com a mudança da estação do ano. O que confirma a capacidade adaptativa dessa gramínea às condições ambientais vigentes, e o quanto esses dois períodos distintos (estação seca e chuvosa) influenciam no comportamento vegetal, determinando sua qualidade em função da água no solo.

4.5.4. Matéria seca de *Urochloa decumbens*, efluxo de CO₂ e umidade do solo

Na tabela 6, observamos o efluxo de CO₂ (CO₂) e a umidade do solo (θ), a produção de matéria seca (MS) e os teores de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) da forragem de *Urochloa decumbens* nas posições do ombro, meia encosta e pedimento em duas encostas sob pastagem com idades distantes. Os dois CPs, escolhidos, foram responsáveis por 78,6% da variância acumulada, em que o CP1 foi responsável por 45,6% e o CP2 por 33% da variância dos dados (Tabela 5).

Tabela 6. Matriz de correlação do efluxo de CO₂, umidade do solo e das variáveis analisadas na *Urochloa decumbens* em pastagens com diferentes idades num Argissolo Vermelho Amarelo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento de duas encostas.

Autovalores	Componente principal 1 (CP1)	Componente principal 2 (CP2)
Variância	2,74	1,98
Variância (%)	45,60	33,01
Variância acumulada (%)	45,60	78,61
Variáveis	CP1	CP2
MS	0,75	0,63
P	0,55	0,51
N	-0,50	0,77
K	0,93	-0,13
O(θ)	-0,55	-0,43
CO ₂	-0,67	0,72

MS= matéria seca; P= Fósforo; N= Nitrogênio; K= Potássio; O (θ)= Umidade volumétrica do solo (cm³ cm⁻³); CO₂= efluxo de CO₂ do solo.

Há correlação positiva entre o CP1 e as variáveis MS, P e K, mas não entre CP1 e as variáveis N, θ e CO₂ (Tabela 6). Pela proximidade do vetor ao eixo CP1, notamos que K é a variável mais importante para esse componente. O CP2 (Tabela 6) teve correlação positiva com as variáveis MS, P, N e CO₂, porém negativa com θ , embora negativa, a correlação do CP2 com K, foi muito fraca (Tabela 6).

No CP1, pela proximidade dos vetores, nota-se a forte correlação entre MS e P, que é muito mais forte que a correlação entre MS e K, embora K seja a variável mais importante do componente (Figura 6). Esse comportamento é compreensível, pois fósforo (P) é o elemento mais limitante à produção vegetal nos solos da região, sempre contido em baixos teores e o potássio (K) o elemento mais abundante, sempre contido em teores de médio a alto (SANTOS et al., 2010; SANTOS e SALCEDO, 2010).

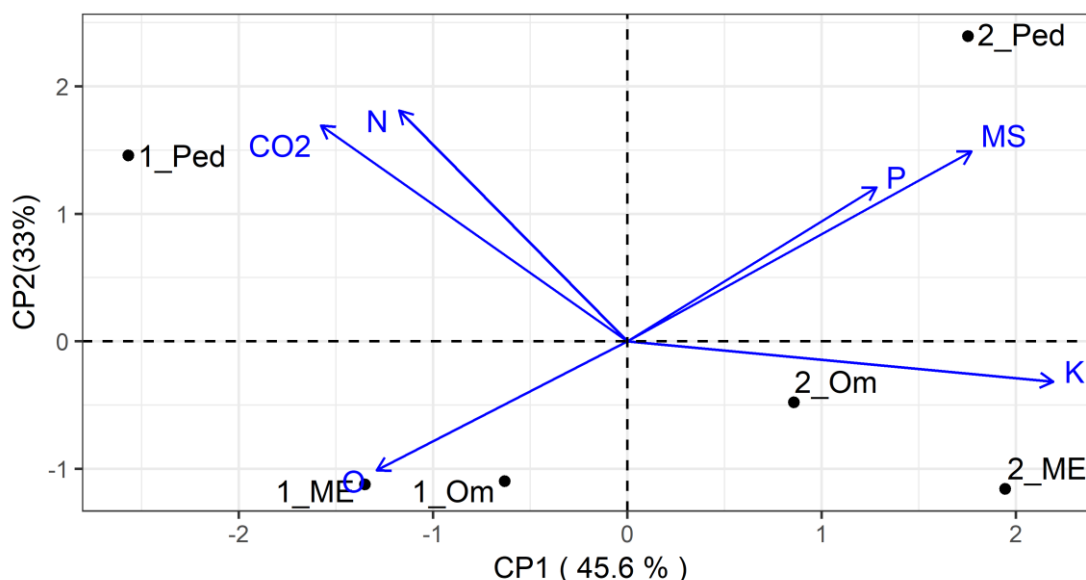


Figura 6. Análise de componentes principais do efluxo de CO_2 , umidade do solo e das variáveis analisadas na *Urochloa decumbens* em pastagens com diferentes idades num Argissolo Vermelho Amarelo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento de duas encostas. Om: ombro, ME: meia encosta, Ped: pedimento; N° 1= Encosta sob pastagem de 22 anos (E22); N° 2= Encosta sob pastagem de 2 anos (E2); MS= matéria seca; P= Fósforo; N= Nitrogênio; O (θ)= Umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); CO_2 = efluxo de CO_2 do solo.

Essas diferenças são controladas pela posição do relevo e textura do solo (SANTOS, SALCEDO e GALVÃO, 2008; WU et al., 2016; TIAN et al., 2017). Santos et al. (2009) observaram que mais de 90% das amostras no ombro, 88% na meia encosta e 78% no pedimento apresentaram baixos níveis de P ($0\text{-}7,7 \text{ mg kg}^{-1}$), no entanto, para potássio (K), tanto no ombro (71%), quanto na meia encosta (53%) e pedimento (68%), a maioria das amostras apresentaram níveis médios ($0,10\text{-}0,29 \text{ cmolc de kg}^{-1}$).

É importante observar que dentro do CP1 (Figura 6) há correlação negativa de N com P, K e MS, logicamente esse comportamento está relacionado à MS, pois o teor dos nutrientes foi analisado na MS, sendo assim a correlação negativa com a MS, indica que a produção ocorre independente da absorção crescente de N, que mesmo se a absorção ou a disponibilidade do elemento diminuir a produção aumentará. Porém, se houver uma diminuição no K e principalmente no P absorvido, haverá limitação da produção de matéria seca. Outra observação é que baseado na correlação negativa de N e MS, na correlação fraca de K e MS, mesmo com o solo da região sendo rico em K, como já discutimos, podemos inferir que P é o nutriente mais limitante nessas áreas, e que entre os nutrientes analisados é ele que controla a produção e oferta de pastagem, nessas encostas.

Ainda no CP1 (Figura 6) há correlação negativa entre MS e θ indicando influência negativa da umidade do solo na produção, provavelmente isto está relacionado ao ano atípico em relação à pluviosidade, pois nos meses de abril a julho de 2017 a precipitação pluvial foi de 832 mm, quase 3 vezes maior que no acumulado dos outros 8 meses do ano. Nesse caso, as altas precipitações interferiram no desenvolvimento radicular, no crescimento da planta e na absorção de P e K, elementos que limitam a produção. A umidade do solo correlaciona-se fracamente, porém positivamente com a absorção de N.

A emissão de CO_2 , no CP1 (Figura 6), correlacionou-se fracamente e positivamente com a umidade do solo, entretanto correlacionou-se fortemente com a absorção de nitrogênio pela forragem. Como, no CP1, a MS correlacionou-se negativamente com N, pode estar indicando que esse N pode ter diminuído de concentração no solo, em virtude da imobilização pelos organismos decompositores, logo os organismos utilizaram esse N disponível como fonte de energia para decomporem a serrapilheira da pastagem e consequentemente houve maior emissão de CO_2 nessas condições.

Para a emissão de CO_2 , no CP2 (Figura 6) houve melhores condições que no CP1, pois além da correlação forte entre o efluxo de CO_2 e N, há correlação positiva entre o efluxo, P e MS, embora fraca, pela angulação formada pelos vetores das variáveis citadas. Mesmo assim, é possível observar que a elevação na produção de MS resulta no aumento da emissão de CO_2 , e que o aumento na absorção de P e principalmente de N também resultam em aumento na emissão de CO_2 do solo. A correlação positiva entre N absorvido pela planta e a emissão de CO_2 no CP2, indica a atividade microbiológica do solo na mineralização da matéria orgânica com consequente aumento na disponibilidade e absorção de N, uma relação direta com a respiração do ecossistema.

Em solo usado com pastagens, a contribuição da respiração heterotrófica (microorganismos) para a respiração total do solo, foi altamente significativa ($P < 0,01$) em função da estação de crescimento da gramínea (SUN, LEI e CHANG, 2019). Hanson et al. (2000) observaram que a respiração autotrófica (respiração radicular) pode representar de 10% a mais de 90% da respiração total do solo *in situ*, dependendo do tipo de vegetação e estação do ano.

Por semelhança, essa mesma amplitude de variação se aplica a respiração microbiológica, afinal a respiração do solo é a soma da respiração heterotrófica e autotrófica. Assim, dependendo das condições ambientais, a emissão de CO_2 pode indicar mineralização da matéria orgânica do solo e disponibilidade de nutrientes.

Analisando as correlações positivas no CP2 (Figura 6) verificamos que nesse componente, repete-se a correlação forte entre N e CO_2 , porém com um fator novo, passa a

existir correlação positiva entre P, N, CO₂ e MS, algo que não aconteceu no CP1, isto indica que há duas condições extremamente distintas nessas duas áreas, e que estão associados à idade da pastagem e a estação do ano.

Pela angulação dos vetores no CP2, nota-se uma correlação fraca entre as variáveis, N + CO₂ e P + MS, no entanto, é uma correlação positiva e indica que a alteração em uma dessas variáveis, resultará em alteração na outra. Outra informação que pode ser retirada é que a atividade heterotrófica e autotrófica (Efluxo de CO₂) está mais associada com a absorção de N pela planta, porém a produção de MS está mais associada com a absorção de P, como já discutimos.

Há uma dinâmica muito grande e clara, em relação ao comportamento das variáveis em função da posição, associada ao tempo de pastejo sobre a encosta e a textura do solo (Figura 6). Nesse aspecto, observa-se que as maiores produções (MS) e absorção de P, ocorreram no pedimento da encosta sob pastagem com dois anos de uso, Motta et al. (2017) também observaram que os teores de P absorvidos pela *Urochloa decumbens* foi maior na pastagem mais jovem.

Além disso, é possível observar, pela localização dos vetores, que MS está inserida no quadrante onde se inseriu as três posições da encosta sob pastagem com 2 anos de uso (E2) em relação a encosta sob pastagem com 22 anos de uso (E22), indicando que a produção é maior nessas três posições da E2 em relação a E22. Os maiores valores de K foram absorvidos nas posições do ombro e meia encosta E2.

A maior umidade do solo foi observada nas posições do ombro e meia encosta na E22 (Figura 6), embora mais inclinada (Tabela 1), possui maior concentração de argila como verificamos na Figura 3, e isso influi significativamente na retenção de água (SILVA et al., 2015) em função da maior capilaridade nessas condições.

As maiores emissões de CO₂ do solo e de absorção de N, ocorreram na posição do pedimento da E22. Vale salientar que na Figura 4, não há correlação dos teores de carbono no solo com a posição do pedimento E22, isto indica que a matéria orgânica dessa posição está sendo decomposta, por isso a maior emissão de CO₂ coincidindo com os menores teores de carbono, além disso, essa tendência linear de relação entre emissão de CO₂ e extração de N do solo, é um forte indicio da utilização do N pela biota decompositora da serrapilheira e mineralizadora da matéria orgânica (MOOSHAMMER et al., 2017).

É importante mencionar que a maior emissão de CO₂ ocorreu na E22, embora a maior produção de matéria seca (MS) tenha ocorrido na E2. Isso indica que a renovação da pastagem além de aumento na produção de matéria seca para alimentação animal, como observou Santos et al. (2007); nas condições avaliadas, no segundo ano de uso, também

resultou em menores efluxos de CO₂. Dessa forma contribuindo para mitigação das emissões de CO₂ como prevê o plano ABC (Agricultura de baixa emissão de carbono) (MAPA, 2012).

4.5.5. Produção de matéria seca (MS) de *Urochloa decumbens* e umidade do solo (θ)

As duas encostas, independentemente da idade do pastejo, apresentaram o mesmo comportamento na produção de matéria seca (MS), em valores médios absolutos, com maior produção no pedimento e menor na meia encosta (Figura 7). Na encosta sob pastagem de 22 anos (E22) a produção média de matéria seca (MS) no período avaliado (10 meses) foi no sentido: Pedimento (47,1 g m⁻²) > ombro (39,8 g m⁻²) > meia encosta (27,7 g m⁻²). E a tendência na encosta sob pastagem de 2 anos (E2), também foi: Pedimento (115,1 g m⁻²) > ombro (78,2 g m⁻²) > meia encosta (67,2 g m⁻²).

A mesma tendência de produção nas duas encostas indica que a localização da posição é o fator controlador da produção na paisagem do relevo, as maiores produções média no pedimento (Figura 7); ocorreram em função dos maiores valores de pH e das maiores concentrações de Na, K e principalmente de P nessa posição (Tabela 4), nas duas encostas. Pois, o P é limitante à produção nessas pastagens, como concluiu Pessoa (2015) avaliando a produção de *Urochloa decumbens* em ambiente protegido com solos de encostas da região, inclusive com solo das posições da E22.

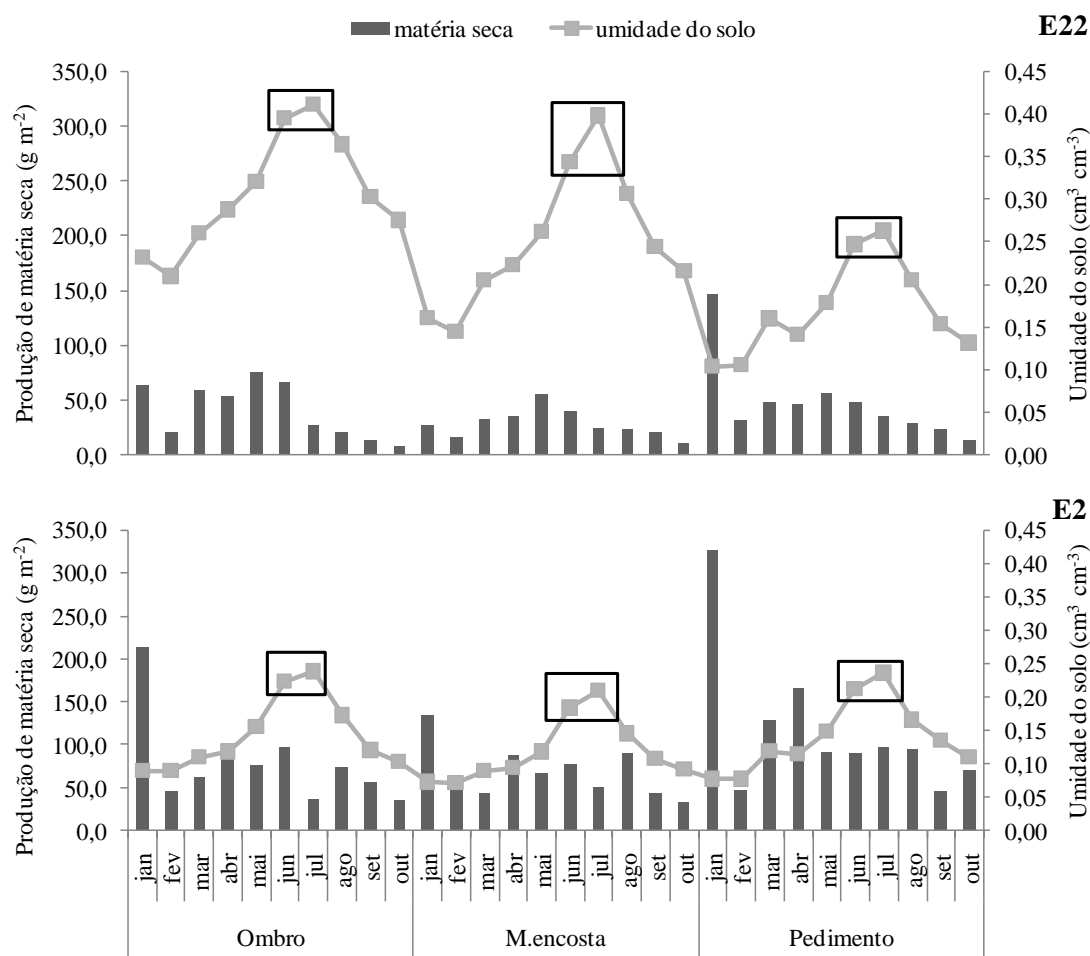


Figura 7. Produção de matéria seca (MS) de *Urochloa decumbens* e relação com a umidade do solo (θ) em duas pastagens com diferentes idades num Argissolo Vermelho Amarelo, nas posições do ombro, meia encosta e pedimento de duas encostas. Encosta sob pastagem de 22 anos (E22); Encosta sob pastagem de 2 anos (E2).

Os valores absolutos da produção média entre as duas pastagens são extremamente contrastantes; em todas as posições, a produção na E2 foi muito maior que na E22. No ombro a produção média na E2 foi 1,96 vezes maior que na E22; na meia encosta, 2,43 vezes maior na E2 que na E22; e no pedimento, 2,44 vezes maior na E2 que na E22. A produção média acumulada na E2 foi mais que o dobro (227%) em relação a E22, indicando a eficiência na recuperação da pastagem para aumentar a produção, além de diminuir as emissões de CO₂ do solo como vimos na Figura 6.

Tais valores são mais representativos que os encontrados por Santos et al. (2007) que avaliaram a influência da reforma das pastagens na produção de matéria seca, e observaram que a pastagem de um ano apresentou uma taxa de produtividade 197% superior, em relação à pastagem com vinte anos. Nossos resultados representam melhor eficiência que os desses autores, pois a pastagem com 2 anos produziu 227% mais matéria seca que a pastagem com 22 anos.

Além disso, em solos sem adubação e com pouca disponibilidade de nutrientes, o sistema radicular é muito importante na nutrição vegetal, pois melhora a eficiência da absorção (ISAAC et al., 2012), e essa eficiência é influenciada pela idade do pasto. Motta et al. (2017) observaram que os teores de P absorvidos pela *Urochloa decumbens*, em solo com teores de P semelhante, foi maior na pastagem mais jovem.

Pela maior quantidade de argila na E22 como vimos na Figura 3, houve maior umidade (armazenamento) mensal, na E22, entretanto, como já observamos o maior armazenamento de água não influenciou na produção. Nas três posições das duas encostas a tendência de aumento da umidade do solo é a mesma, em função da pluviosidade mensal (Figura 2) na área. Nas posições do ombro e meia encosta, nas duas encostas, a água armazenada é crescente de fevereiro até julho (em destaque na Figura 7) e decresce em seguida.

É bom frisar que embora as chuvas de maio (108 mm) e junho (172 mm) tenham sido menores que as de abril (186 mm) (Figura 2), o armazenamento médio de água no solo, nesses meses, aumentaram linearmente nas posições do ombro e meia encosta nas duas encostas. Isso ocorreu porque a água, no solo, já se encontrava em teores elevados e as condições ambientais não incidiram em altas evapotranspirações, nesse caso, mantendo um armazenamento constante, que aumentaram com precipitações subsequentes.

Fato confirmado pelo que ocorreu após o mês de julho (366 mm de pluviosidade), porque nos meses seguintes houve redução linear na umidade do solo, em função da estação seca, e aumento da evapotranspiração do solo (GALVÃO, SALCEDO e SANTOS, 2005).

Nas duas encostas, o pedimento é a posição mais arenosa com 700 g kg^{-1} na E22 e 763 g kg^{-1} na E2, possuem comportamento semelhante no armazenamento de água e é a posição mais produtiva. A tendência de armazenamento no pedimento difere do ombro e meia encosta, com menor armazenamento de água; e uma diminuição no armazenamento no mês de abril em relação a março, isso ocorre porque quanto maiores os teores de areia e menores os teores de argila menos força de retenção por capilaridade e maior o efeito da gravidade retirando água da encosta (REICHARDT e TIMM, 2012).

Outro aspecto a ser destacado é que a tendência de produção e de umidade do solo não é igual, ao passo que o aumento linear no armazenamento de água não coincide com o aumento na produção; a produção oscila ao longo dos meses de avaliação no período chuvoso, enquanto a umidade aumenta.

E por isso há correlação negativa entre umidade do solo e a produção de matéria seca da pastagem (Figura 6), pois a correlação avalia tendências lineares. Essa não

correlação não é comum em um ambiente de sequeiro (a entrada de água no ecossistema é oriunda dos eventos de chuva) e por isso só há produção quando a umidade do solo é favorável. Porém tem que ser levado em consideração que no ano avaliado houve uma estação chuvosa atípica na região, com mais chuvas e mais concentradas, que nos anos anteriores.

Portanto, essas altas precipitações com consequente aumento da umidade do solo, principalmente entre os meses de maio a julho, interferiram negativamente no desenvolvimento radicular e consequentemente na produção, pois como pode ser verificado na Figura 7, há uma tendência de diminuição da produção na E22 a partir de junho. E entre junho e Julho na E2, a exceção do pedimento.

4.6. CONCLUSÕES

1. Independentemente da idade de uso da pastagem sobre a encosta, a maior produção foi no pedimento e a menor na meia encosta. A análise de correlação dos nutrientes extraídos pela planta demonstrou que P é o nutriente que limita a produção da pastagem.
2. A produção não seguiu a mesma tendência da umidade do solo, a umidade do solo foi maior na encosta sob pastagem com 22 anos de uso, enquanto a produção foi maior na encosta sob pastagem com 2 anos de uso.
3. A recuperação da pastagem aumentou a produção e melhorou a qualidade do pasto, além de reduzir a emissão de CO₂.
4. A idade da pastagem teve maior influência que o conteúdo de água armazenada no solo, para a emissão de CO₂ do solo e para a produção da pastagem; porém a idade da pastagem não teve maior influência que as posições do relevo na emissão de CO₂, na produção e qualidade da pastagem e na umidade do solo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos em solos de encostas são fundamentais para monitorar, diagnosticar e prevenir a degradação, já que boa parte das áreas de encostas em regiões de relevo ondulado podem estar sendo ocupadas por pastagens extensivas. Pesquisas que avaliem o deslocamento vertical e horizontal, ou a perda de nutrientes e solo em diferentes posições, podem contribuir significativamente para o entendimento da dinâmica de produção de ecossistemas que dependem da ciclagem de nutrientes da matéria orgânica do solo para produzirem.

Soma-se a isto a necessidade de também se avaliar o movimento vertical e o escoamento da água nessas áreas, avaliando toda a extensão da topossequência, e não só a encosta.

A recuperação da pastagem contribuiu com a manutenção do estoque de carbono orgânico do solo e melhorou a produção e a nutrição da pastagem. As avaliações em um ano atípico de precipitações, na região do brejo paraibano, com altas precipitações de dezembro de 2016 até julho de 2017, resultaram em algumas informações que precisam ser melhores estudadas em trabalhos futuros.

A adubação com nitrogênio e principalmente com fósforo, muito deficiente nesses solos, seria uma ótima estratégia de manejo para essas pastagens. Além disso, a diminuição do número de animais na área, para uma carga animal adequada (cerca de 450 kg de peso vivo por hectare), faz-se necessário para que se mantenha a capacidade produtiva dessas pastagens por longo tempo. A continuação do pousio, que hoje ocorre na área, e o prolongamento desse período de pousio, é uma ótima estratégia para recuperação da oferta de forragem aos animais, durante o ano.

A posição na encosta teve forte influência na produção de forragem, na decomposição de serrapilheira e consequentemente na emissão de CO₂, devido às modificações nas propriedades físicas e químicas do solo e na infiltração da água, que ocorreram em função da textura do solo. O pedimento foi à posição com maior dinâmica de produção e absorção de nutrientes pelo pasto, em função da maior disponibilidade de água no solo, pois nessa posição observou-se que a água está armazenada com menores forças de retenção.

4.7. REFERÊNCIAS

- ARAUJO, K.D.; ANDRADE, A. P.; ROSA, P. R. O.; BRUNO, R. L. A.; FRAGA, V. S.; Avaliação da atividade microbiana baseada na produção de C-CO₂ em uma área de Caatinga no Cariri paraibano. **Caatinga**, v.21, n.3, p.221-230, 2008.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.
- ALVAREZ VENEGAS, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; E LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (eds). Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª aproximação. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Viçosa, MG, p.25-32, 1999.
- BACKES, C.; SANTOS, A. J. M.; RODRIGUES, L. M.; TEODORO, A. G.; RIBON, A. A.; BÔAS, R. L. V.; PEREIRA, L. M.; FRANCO, Y. M. Recovery of a dystrophic Red Latosol (Oxisol) and pasture as a function of gypsum in the Cerrado biome. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 46, n. 4, p. 286–295, 2017.
- HANSON, P. J.; EDWARDS, N. T.; GARTEN, C. T.; ANDREWS, J. A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. **Biogeochemistry**, v. 48, n. 1, p. 115–146, 2000.
- ISAAC, M. E.; HINSINGER, P.; HARMAND, J. M. Nitrogen and phosphorus economy of a legume tree-cereal intercropping system under controlled conditions. **Science of the Total Environment** v.434, p.71-78, 2012.
- KIZEKOVÁ, M.; HOPKINS, A.; KANIANSKA, R.; MAKOVNÍKOVÁ, J.; POLLÁK; PÁLKA, B. Changes in the area of permanent grassland and its implications for the provision of bioenergy: Slovakia as a case study. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 1, p. 218–232, 2018.
- LIMA, F. V.; SILVINO, G. S.; SOUZA MELO, R. S.; LIRA, E. C.; RIBEIRO, T. S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.4, p.53-63, 2015.
- MAPA, Ministério da agricultura pecuária e abastecimento. **Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-Plano-abc/download.pdf>. Acesso em: 04/04/2019.
- MARTUSCELLO, J. A.; JANK, L.; MARQUES, M.; NETO, G.; LAURA, A.; NORONHA, D.; VIEIRA, F. Produção de gramíneas do gênero *Brachiaria* sob níveis de sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.7, p.183-1190, 2009.
- MEI, X.; ZHU, Q.; MA, L.; ZHANG, D.; LIU, H.; XUE, M. The spatial variability of soil water storage and its controlling factors during dry and wet periods on loess hillslopes. **Catena**, v. 162, p. 333–344, 2018.

MOOSHAMMER, M.; HOFHANS, F.; FRANK, A. H.; WANEK, W.; HÄMMERLE, I.; LEITNER, S.; et al. Decoupling of microbial carbon, nitrogen, and phosphorus cycling in response to extreme temperature events. **Science Advances**, n.5, v.3, 2017.

MOTTA, P. E. F.; SIQUEIRA, J. O.; RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; CURI, N. *Urochloa decumbens* growth and P uptake as affected by long-term phosphate fertilization, mycorrhizal inoculation and historical land use in contrasting Oxisols of the Brazilian Cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, v.41, n.2, p.209–219, 2017.

PESSOA, T.C. **A posição na encosta e o manejo de um Argissolo afetam a produção de *Brachiaria decumbens* adubada com N e P?**. Areia-PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, fevereiro de 2015. 43p.il. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 2.ed. Barueri, Manole, 2012. 524p.

SUN, S.; LEI, H.; CHANG, S.X. Drought differentially affects autotrophic and heterotrophic soil respiration rates and their temperature sensitivity. **Biology and Fertility of Soils**, v.55, p.275-283, 2019.

SANTOS, A.C.; Influência do uso e da posição do perfil no relevo na fertilidade de solos em áreas de encosta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.39, n.1, p.31-37, 2009.

SANTOS, A.C.; SALCEDO, I.H. Relevo e fertilidade do solo em diferentes estratos da cobertura vegetal na bacia hidrográfica da represa Vaca Brava, Areia, PB. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.2, p.277-285, 2010.

SANTOS, A.C.; SALCEDO, I.H.; GALVÃO, S.R.S. Relações entre uso do solo, relevo e fertilidade do solo em escala de microbacia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.5, p.498-504, 2008.

SANTOS, J. T. D.; ANDRADE, A. P.; SILVA, I. D. F.; SILVA, D. S.; SANTOS, E. M.; SILVA, A. P. G. Atributos físicos e químicos do solo de áreas sob pastejo na micro Região do Brejo paraibano. **Ciência Rural**, v.40, n.12, dez, 2010.

SANTOS, R. S. M. DOS; OLIVEIRA, I. P. DE; MORAIS, R. F. DE; URQUIAGA, S. C.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria* spp. em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade em ambiente de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 119–124, 2007.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Potassium: a neglected nutrient in global change. **Global Ecology and Biogeography**, v.24, p.261-275.

SILVA, A. J.; CUNHA, F. F.; ROQUE, C. G.; SILVA, M. D. T.; RIBEIRO, D. O.; CARBALLAL, M. R. Replacement of liming and NPK fertilization with Turkey litter in degraded areas grown with *Urochloa decumbens*. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 2, p. 467–475, 2018.

SILVA, A.P.; RESENDE A. S.; CHAER, G. M.; GONÇALVES, F. L. A.; CAMPELLO, F. C. Influência da forma e posição da encosta nas características do solo e na regeneração

natural em áreas de pastagem abandonadas. **Ciência Florestal**, v.28, n. 3, p.1239-1252, 2018.

SILVA, M. R.; PELISSARI, A.; MORAES, A. D.; SANDINI, I. E.; CASSOL, L. C.; ASSMANN, T. S.; OLIVEIRA, E. B. Acumulação de nutrientes e produção forrageira de aveia e azevém em função da aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 38, n. 3, p. 346-356, 2015.

SOUZA, F. M.; LEMOS, B. J. M.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; MAGNABOSCO, C. U.; CASTRO, L. M.; LOPES, F. B.; BRUNES, L. C. Introdução de leguminosas forrageiras, calagem e fosfatagem em pastagem degradada de *Brachiaria brizantha*. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.17, n.3, p.355-364, 2016.

TIAN, L.; ZHAO, L.; WU, X; FANG, H.; ZHAO, Y.; et al. Soil moisture and texture primarily control the soil nutrient stoichiometry across the Tibetan grassland. **Science of the Total Environment**, v.622–623, p.192–202, 2018.

TIAN, L.M.; ZHAO, L.;WU, X.D.; FANG, H.B.; ZHAO, Y.H.; YUE, G.Y.; LIU, G.M.; CHEN, H. Vertical patterns and controls of soil nutrients in alpine grassland: implications for nutrient uptake. **Science of the Total Environment**, v.607, p.855-864, 2017.

WU, X.; ZHAO, L.; FANG, H.; ZHAO, Y.; SMOAK, J. M.; PANG, Q.; DING, Y. Environmental controls on soil organic carbon and nitrogen stocks in the high-altitude arid western Qinghai-Tibetan Plateau permafrost region. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences** v.121, 2016.

ZHENG, Y.; LI, F.; HAO, L.; SHEDAYI, A. A.; GUO, L.; MA, C.; HUANG, B.; XU, M. The optimal CO₂ concentrations for the growth of three perennial grass species. **BMC Plant Biology**, v. 18, n. 1, p. 1–12, 2018.